

UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO
Especialización, Maestría y Doctorado en Diseño

CARACTERIZACIÓN DE LA ABSORCIÓN SONORA EN MODELOS FÍSICOS A ESCALA

Laura Angélica Lancón Rivera

Tesis para optar por el grado de Maestra en Diseño
Línea de Investigación: Arquitectura Bioclimática

Miembros del Jurado:

Dr. Fausto E. Rodríguez Manzo

Director de la tesis

Mtra. Verónica Huerta Velázquez

Mtro. Manuel Gordon Sánchez

Mtra. Elisa Garay Vargas

Dr. José Arturo Campos Rodríguez

Dr. Ricardo Aguayo González

México D.F.
Julio de 2012

DEDICATORIA

A mi madre, por su apoyo incondicional en cada logro de mi vida.

A mi padre^t, por su legado en cuanto a disciplina.

A mis hermanas: Marcela, Verónica y Rocío por su paciencia y compañía.

A Rubén, por su amor, confianza, tolerancia, apoyo y consejos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de mi familia, principalmente de mi madre, quien es un ejemplo de superación en mi vida y de mi padre, quien me dejó grandes enseñanzas y estoy segura le hubiera gustado compartir este logro conmigo. También debo agradecer a mis hermanas: Marcela, Rocío y Verónica, por estar siempre ahí; y a Rubén por su inmensa confianza, entusiasmo y apoyo para concluir esta nueva meta en mi vida.

Quiero agradecer al Dr. Fausto E. Rodríguez Manzo, por la confianza brindada para indagar y profundizar en este tema, el cual resulta un poco complicado de comprender para nosotros los arquitectos. Gracias por el apoyo brindado para la adquisición de equipo e instrumentos necesarios para esta investigación y por facilitarme un espacio en el Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico (LADAc) para realizar las mediciones. Gracias nuevamente por guiarme en este tema de la Acústica Arquitectónica, el cual me ha resultado fascinante.

Por otra parte, también agradezco a los miembros del jurado, los maestros y doctores: Verónica Huerta Velázquez, Manuel Gordon Sánchez, Elisa Garay Vargas, José Arturo Campos Rodríguez y Ricardo Aguayo González, por aceptar ser partícipes de este logro.

Un especial agradecimiento a los Ingenieros en Mecatrónica: Oscar Manuel Álvarez Isidro, Julio César Hernández Sandoval y Federico Furlán Colín de U.P.I.I.T.A. del Instituto Politécnico Nacional, por el diseño, manufactura y construcción del tubo de impedancias, así como del software para la medición del coeficiente de absorción sonora de los materiales. Particularmente agradezco al Ing. Federico Furlán Colín por el diseño del software para la medición del tiempo de reverberación y por su invaluable apoyo durante esta investigación.

Agradezco infinitamente al Licenciado en Físico Matemáticas Miguel Ángel Toledo Martínez por las asesorías brindadas en temas relacionados con matemáticas y estadística; y por su ayuda para analizar y resolver algunos problemas.

Así mismo, agradezco al Mtro. Antonio Abad por su ayuda en el recorte de las muestras de diversos materiales en el taller de plásticos y al DCG. Rafael Villeda por su apoyo en la construcción del modelo físico a escala en el taller de maquetas; así como a los diseñadores

Industriales Javier Bravo Ferreira y Alberto Cervantes Baqué, por su apoyo para el uso de los talleres de plástico y madera respectivamente.

Igualmente agradezco al Mtro. Carlos García Malo por la revisión de algunos capítulos de esta investigación y por sus sugerencias.

Finalmente agradezco a dos compañeras y amigas: a la Arq. Silvia Gabriela García Martínez por su invaluable amistad y por acompañarme en este viaje lleno de descubrimientos para ambas; y a la Mtra. Elisa Garay Vargas por su apoyo incondicional durante esta investigación.

RESUMEN

Dentro del campo de la Acústica Arquitectónica, el empleo de modelos físicos a escala para predecir en comportamiento del sonido dentro de un espacio adquirió gran importancia después de la Segunda Guerra Mundial. Sin embargo, a mediados de los años 80's, con la introducción de computadoras, surgieron algunos programas de simulación acústica por computadora, dejando atrás a los modelos físicos a escala.

A pesar de ello, actualmente algunos acústicos y arquitectos siguen empleando los modelos físicos a escala en conjunto con los modelos computacionales, debido a que estos últimos presentan ciertas limitaciones en la reproducción del sonido dentro de un espacio y a que los modelos físicos a escala emplean sonido real y por lo tanto su comportamiento también lo es.

No obstante, el empleo de materiales absorbentes en modelos físicos a escala aun presenta ciertos inconvenientes para su caracterización de los utilizados en un espacio real. Es por ello que en esta investigación se plantea la posibilidad de la obtención de coeficientes de absorción sonora de materiales empleados en modelos físicos a escala, a partir del método de tubo de impedancias y comprobarlos mediante un modelo de simulación por computadora y por ende en un modelo físico a escala.

Según lo anterior, para el desarrollo del experimento fue necesaria la construcción de un tubo de impedancias que midiera en frecuencias altas (por arriba de los 4 000 Hz), la construcción de un modelo físico a escala que simulara un espacio cualquiera, así como la simulación de dicho espacio a partir de un programa de simulación acústica por computadora.

ÍNDICE GENERAL

Índice General

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

	Página
Introducción	1
1. Estado del conocimiento	9
1.1. Modelos físicos a escala en arquitectura	11
1.1.1. Clasificación tipológica	11
1.1.2. Materiales empleados	18
1.1.2.1. Papeles, cartulinas y cartones	19
1.1.2.2. Maderas	21
1.1.2.3. Plástico y polímeros	22
1.1.2.4. Espumas	23
1.1.2.5. Metales	24
1.1.2.6. Otros (textiles, pinturas, arena, entre otros)	26
1.2. Una visión retrospectiva de la simulación del sonido en la arquitectura	27
1.2.1. Edad Antigua, Edad Media y Época Moderna	27
1.2.2. Época Contemporánea	30
1.2.3. Tendencias actuales	42
1.3. Conclusiones	48
2. Fundamentos teóricos de acústica arquitectónica	49
2.1. El sonido	50
2.1.1. Generación y propagación del sonido	50
2.1.2. Velocidad del sonido	52
2.1.3. Longitud de onda, periodo y frecuencia del sonido	53
2.1.4. Bandas de octava	55
2.1.5. Nivel de sonido y Decibel	56
2.2. El sonido dentro de los espacios arquitectónicos	58
2.2.1. Comportamiento del sonido dentro de un recinto	58
2.2.1.1. Reflexión	61
2.2.1.2. Difusión	64
2.2.1.3. Difracción	67

2.2.1.4. Absorción	68
2.2.2. Fenómenos acústicos dentro de un recinto	70
2.2.2.1. Reverberación	70
2.2.2.2. Resonancia	71
3. Tiempo de reverberación y otros parámetros de calidad acústica	73
3.1. Reverberación	74
3.1.1. Medición del tiempo de reverberación	76
3.1.2. El tiempo de reverberación, medida de la calidad acústica	78
3.2. Otros parámetros de calidad acústica	80
4. La absorción sonora y otras propiedades acústicas	83
4.1. Absorción sonora	84
4.1.1. Coeficientes de absorción sonora	85
4.1.2. Materiales absorbentes	88
4.1.3. Obtención del coeficiente de absorción sonora	96
4.1.3.1. Tubo de impedancias (incidencia normal o directa)	96
4.1.3.2. Cámara reverberante (incidencia aleatoria)	101
4.1.3.3. Cámara reverberante en miniatura	106
4.2. Otros parámetros acústicos	108
4.3. El papel de la absorción sonora en la acústica arquitectónica	110
5. Planteamiento del problema y desarrollo del experimento	112
5.1. Introducción	113
5.2. Planteamiento del problema y alcances del experimento	113
5.3. Desarrollo del experimento	114
5.3.1. Etapa 1 – Obtención de coeficientes de absorción sonora mediante el método de tubo de impedancias	116
5.3.1.1. Normatividad aplicable	116
5.3.1.1.1. Equipo e instrumentación requeridos	118
5.3.1.1.1.1. Construcción del tubo de impedancias	118
5.3.1.1.1.2. Equipo e instrumentos complementarios	131
5.3.1.2. Cálculo del coeficiente de absorción sonora	139
5.3.1.2.1. Proceso de medición	146
5.3.1.2.2. Resultados obtenidos	149

5.3.1.2.2.1.	Validación del tubo de impedancias	149
5.3.1.2.3.	Coeficientes de absorción sonora de materiales utilizados en modelos físicos a escala	156
5.3.1.2.3.1.	Clasificación de resultados	159
5.3.2.	Etapas 2 – Comprobación de los coeficientes de absorción sonora de algunos materiales mediante un experimento en un caso de estudio, utilizando un modelo físico a escala	163
5.3.2.1.	Modelo físico a escala	163
5.3.2.1.1.	Descripción del caso de estudio	163
5.3.2.1.1.1.	Proporción y volumen del espacio	164
5.3.2.1.1.2.	Modos propios de vibración	166
5.3.2.1.1.3.	Selección de materiales	167
5.3.2.1.1.4.	Construcción del modelo físico a escala	167
5.3.2.2.	Normatividad aplicable	168
5.3.2.2.1.	Equipo e instrumentación requeridos	170
5.3.2.3.	Cálculo del tiempo de reverberación	172
5.3.2.3.1.	Descripción del funcionamiento del software RT	172
5.3.2.3.2.	Proceso de medición	178
5.3.2.3.3.	Resultados obtenidos	182
5.3.3.	Etapas 3 – Comprobación de los coeficientes de absorción sonora de algunos materiales mediante un experimento en un caso de estudio, utilizando un modelo de simulación por computadora	183
5.3.3.1.	Modelo de simulación por computadora	184
5.3.3.1.1.	Proceso de simulación	184
5.3.3.2.	Obtención del tiempo de reverberación	187
5.3.3.2.1.	Resultados obtenidos	189
6.	Discusión y análisis de resultados	191
6.1.	Comparación de resultados	192
6.2.	Discusión	200
7.	Resumen general y conclusiones	215
7.1.	Introducción	216
7.2.	¿Qué se hizo?	217
7.3.	¿Qué se encontró?	217

7.4. Conclusiones	220
7.5. ¿Qué falta por hacer?	225
7.6. Epílogo	226
Bibliografía	227
Anexos	239
Anexo 1 – Planos e imágenes digitales de los distintos elementos que conforman el tubo de impedancias	239
Anexo 2 – Proceso de manufactura del tubo de impedancias	256
Anexo 3 – Tutorial para la medición de coeficientes de absorción por el método de tubo de impedancias	263
Anexo 4 – Lista de materiales medidos en tubo de impedancias	281
Anexo 5 – Modos propios de vibración del espacio propuesto a escala 1:1 y 1:10	289
Anexo 6 – Proceso de caracterización de fuente sonora en miniatura	293
Anexo 7 – Caracterización de la fuente sonora en el CATT-Acoustics	297
Anexo 8 – Comunicación establecida mediante correo electrónico con Jin Yong Jeon	298
Anexo 9 – Gráficas del coeficiente de absorción sonora de los materiales medidos en tubo de impedancias	299
Curriculum	312

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Modelo físico a escala de un terreno. (http://archiseek.com/)	12
Fig. 1.2. Modelo físico a escala de un paisaje (Charlotte, Carolina del Norte, EE. UU.). (http://www.howardmodels.com/)	12
Fig. 1.3. Modelo físico a escala de un jardín (Jardín de la azotea del Centro Médico de San Lucas, California, EE. UU.). (http://www.russellmillsstudios.com/)	13
Fig. 1.4. Modelo físico a escala de un proyecto urbano (Distrito de Victoria, Milán, Italia). (http://www.oneoff.it/)	13
Fig. 1.5. Modelo físico a escala de un edificio (Proyecto de ampliación de la Escuela Meritxell en Andorra). (http://www.artkitech.es/)	14
Fig. 1.6. Modelo físico a escala de la estructura de una casa, a base de postes y vigas. (http://www.lapponiaopifex.fi/)	14
Fig. 1.7. Modelo físico a escala de un espacio interior (Tienda GIAN MARCO VENTURI, Milán, Italia). (http://www.oneoff.it/)	14
Fig. 1.8. Modelo físico a escala del detalle de una escalera de espiral en madera de roble maciza (Detalle de la escalera de la residencia del Arq. Michael Hopkins). (http://www.invermodels.co.uk/)	15
Fig. 1.9. Proceso para la elaboración del modelo físico a escala de unos sillones. (http://elinabusmane.wordpress.com/)	15
Fig. 1.10. Modelo a escala de mobiliario urbano (Diseño de una marquesina para un concurso en Nueva York, EE. UU.). (http://www.aescalamaquetas.com/)	15
Fig. 1.11. Modelos topográficos en diferentes etapas: (a) nivel anteproyecto, (b) nivel proyecto y (c) nivel ejecución. (a) (http://p7mariaeliceguiucjc.blogspot.mx/), (b) y (c) (http://www.archivisionmodels.com/)	17
Fig. 1.12. Modelos de proyectos urbanos en diferentes etapas: (a) nivel anteproyecto, (b) nivel proyecto y (c) nivel ejecución. (a) (http://unidadjantonioortiz.blogspot.mx/), (b) (http://eduardoiberico.wordpress.com/) y (c) (http://www.myurbanist.com/)	18
Fig. 1.13. Modelos de edificios en diferentes etapas: (a) nivel anteproyecto, (b) nivel proyecto y (c) nivel ejecución. (a) (http://www.aescalamaquetas.com/), (b) (http://www.oneoff.it/) y (c) (http://www.sweetonioncreations.com/)	18
Fig. 1.14. Variedad de: (a) y (b) papeles, (c) cartulinas texturizadas, (d) cartones corrugados, (e) cartones micro corrugados, (f) mamparas <i>foam board</i> y (g) corchos. (a) y (b) (http://www.difoto.es/), (c) (http://manualidades.innatia.com/), (d) (http://www.valenbeck.co.uk/), (e) (http://wanlinksniper.blogspot.mx/), (f) (http://www.artstoreonline.com.au/) y (g) (http://www.multifeutre.com/)	20
Fig. 1.15. Modelo físico a escala realizado con cartón batería.	20
Fig. 1.16. Modelo físico a escala realizado con cartón batería y papeles.	20
Fig. 1.17. Diversidad de maderas: (a) MDF, (b) triplay, (c) madera balsa, (d) y (e) chapa de madera. (a) (http://www.consmos.com/), (b) (http://www.bozovich.com/), (c) (http://www.c2f.com/html/), (d) (http://www.hardwoodflooringbuyersguide.com/) y (e) (http://www.materialicious.com/)	21

Fig. 1.18. Modelo físico a escala del nuevo Senado de la República Mexicana, elaborado en madera balsa. (http://hago.com.mx/)	21
Fig. 1.19. Variedad de plásticos: (a) acrílico, (b) polipropileno, (c) estireno y (d) espuma de poliestireno expandido. (a) (http://francisca-martinez.blogspot.mx/), (b) (http://www.artstore.co.uk/), (c) (http://marzua.blogspot.mx/) y (d) (http://www.rolysig.com/)	22
Fig. 1.20. Modelo físico a escala de la Facultad de Arquitectura de Tesalónica en Grecia. El modelo está elaborado con materiales como estireno y otros plásticos, además de diversos papeles. (http://www.architecturalmodel.gr/)	23
Fig. 1.21. Espumas de poliuretano expandido: (a) suaves y (b) rígidas. (a) (http://www.jomaro.com.ar/) y (b) (http://www.poliuretanos.com/)	23
Fig. 1.22. Modelo físico a escala a nivel conceptual, elaborado con espuma rígida de poliuretano expandido. (http://homepages.mty.itesm.mx/)	24
Fig. 1.23. Materiales metálicos: (a) alambre, (b) y (c) láminas de aluminio, (d) malla metálica. (a) (http://www.grupocobos.com.mx/), (b) (http://manualidadesnavidenas.net/) (c) (http://www.bondtape.es/) y (d) (http://www.archiexpo.es/)	24
Fig. 1.24. Modelo físico a escala a nivel conceptual. Elaborado con alambres y láminas de aluminio. (http://marialladro3y4.blogspot.mx/)	25
Fig. 1.25. Modelo físico a escala de una estructura metálica. Modelo elaborado con alambres. (http://www.oneoff.it/)	25
Fig. 1.26. Modelo físico a escala del Estadio Nacional de Beijing en China. Modelo elaborado con diversos metales y recubierto de estaño. (http://en.beijing2008.cn/)	25
Fig. 1.27. Materiales diversos: (a) pinturas acrílicas para maquetas, (b) lycras, (c) y (d) pasto artificial para maquetas y (e) arena natural. (a) (http://moeidolatry.com/), (b) (http://www.emestext.com/), (c) (http://blog.craftzine.com/), (c) (http://www.architectural-scalemodel.com/) y (d) (http://www.google.es/)	26
Fig. 1.28. Modelos físicos a escala empleando: (a) material modelable (propuesta para el Museo de las Ciencias en Almería, España), (b) lycra para representar velarías (propuesta de un complejo de oficinas) y (c) pasto y árboles para maquetas (representación del parque San Diego en Cholula, Puebla, México). (a) (http://www.aescalamaquetas.com/), (b) (http://maquetas-profesionales.blogspot.mx/) y (c) (http://architecturalmodels.blogspot.mx/)	26
Fig. 1.29. Diagramas de rayos sonoros de diferentes tipos de plantas, desarrollados por Saunders en su tratado sobre teatros " <i>Treatise on Theaters</i> " en 1790. (Thompson, 2002)	29
Fig. 1.30. Fotografías del modelo físico a escala construido por Sabine, para estudiar el comportamiento del sonido dentro del mismo, a partir del método de Schillereen. Fotografías tomadas por Sabine en 1925. (Addis, 2009)	30
Fig. 1.31. Estudio de los rayos sonoros de la Sala Henri-le-Boeuf, en Bruselas. Diagramas realizados por Víctor Horta en 1928 (documentos provenientes del archivo del Museo de Horta). (Addis, 2009)	31
Fig. 1.32. Fotografía tomada de la pantalla de un osciloscopio, que muestra el decaimiento sonoro de un modelo físico a escala realizado por Spandök (1934). (Addis, 2006)	33
Fig. 1.33 y 1.34. Primer modelo físico a escala de la Ópera de Sídney realizado por Jordan. (Addis, 2006 y 2009)	34

Fig.1.35 y 1.36. Segundo modelo físico a escala de la Ópera de Sídney realizado por Jordan. (Addis, 2006 y 2009)	35
Fig. 1.37. Último modelo físico a escala de la Ópera de Sídney realizado por Jordan. (Addis, 2009)	35
Fig. 1.38. Medición en uno de los modelos físicos a escala de la Ópera de Sídney realizados por Jordan. (http://www.jordanakustik.dk/)	36
Fig. 1.39. Primer modelo físico a escala de uno de los estudios de la <i>Maida Vale Studios</i> de la BBC. (Harwood y Burd, BBC, 1970)	38
Fig. 1.40. Cámara reverberante escala 1:8 de la BBC. (Adaptada de: Spring et al., BBC, 1971)	39
Fig. 1.41 y 1.42. Modelos físicos a escala de dos estudios de la BBC. (Mathers, BBC, 1981)	40
Fig. 1.43. Tiempo de reverberación de un estudio de la BBC, medidos en: (a) modelo físico a escala con 70 escalas humanas hechas de espuma de poliuretano, las cuales simulaban músicos, (b) espacio real con 60 integrantes de la orquesta y (c) espacio real con 70 miembros del coro. (Adaptada de: Harwood et al., BBC, 1972)	41
Fig. 1.44. Tiempo de reverberación de un estudio de la BBC, medidos en: (a) espacio real y (b) modelo físico a escala. (Adaptada de: Walker, BBC, 1984)	41
Fig. 1.45. Estudio del comportamiento del sonido en las primeras simulaciones por computadora. Espacio en forma de abanico. (Stettner y Greenberg, 1989)	43
Fig. 1.46. Estudio del comportamiento del sonido en las primeras simulaciones por computadora. Espacio en forma de caja. (Stettner y Greenberg, 1989)	43
Fig. 1.47. Estudio del comportamiento del sonido en las primeras simulaciones por computadora. Espacio en forma de abanico invertido. (Stettner y Greenberg, 1989)	43
Fig. 1.48 y 1.49. Ejemplo de simulaciones en <i>CATT - Acoustics</i> . (http://www.acousticfield.jp/product/cattacoustic.html) y (http://www.wsdg.com/) respectivamente	46
Fig. 1.50 y 1.51. Ejemplo de simulaciones en <i>ODEON</i> . (http://www.odeon.dk/)	46
Fig. 1.52 y 1.53. Ejemplo de simulaciones en <i>RAMSETE</i> . (http://pcfarina.eng.unipr.it/)	46
Fig. 1.54 y 1.55. Ejemplo de simulaciones en <i>EASE</i> . (http://avaxhome.ws/software/software_type/scientific/Engineering/Simulator)	47
Fig. 2.1. Ondas sonoras viajando a través de un medio. (A) La onda causa que las partículas de aire se presionen (compresión) y se extiendan (enrarecimiento). (B) Un instante después la onda se mueve ligeramente hacia la derecha. (Adaptada de: Everest y Pohlmann, 2009, p. 5)	51
Fig. 2.2. El movimiento de las ondas puede ser (A) de manera circular, (B) transversal y (C) longitudinal dependiendo del medio por el que se propaguen. (Adaptada de: Everest y Pohlmann, 2009, p. 4)	51
Fig. 2.3. Gradiente de temperatura negativo. (Pérez, 1989)	52
Fig. 2.4. Gradiente de temperatura positivo. (Pérez, 1989)	53
Fig. 2.5. Longitud de onda del sonido. (Carrión, 1998, p. 33)	53
Fig. 2.6. Ejemplos de periodos de dos longitudes de onda distintos. (Arau, 1999, p. 12)	54
Fig. 2.7. Oscilaciones de onda a diferentes frecuencias, de 1 y 10 Hz. (Carrión, 1998, p. 29)	54
Fig. 2.8. Relación entre longitud de onda y frecuencia. (Carrión, 1998, p. 34)	54
Fig. 2.9. Llegada del sonido directo e indirecto (primeras reflexiones). (Carrión, 1998, p. 51)	59
Fig. 2.10. Comportamiento del sonido ante un material.	59

Fig. 2.11. Efectos de una onda ante una superficie absorbente, reflejante y difusa. (Carrión, 1998, p. 123)	60
Fig. 2.12. Comportamiento del sonido dentro de un espacio. (Adaptada de: Doelle, 1972, p. 23)	61
Fig. 2.13. Reflexión especular. (Adaptada de: Everest y Pohlmann, 2009, p. 96)	62
Fig. 2.14. Sonido directo, primeras reflexiones y reflexiones tardías. (Carrión, 1998, p. 50)	63
Fig. 2.15. Representación de reflexiones en un recinto (La Fenice, concurso internacional). (Arau, 1999, p. 57)	64
Fig. 2.16. Incidencia de una onda sonora sobre una superficie de curvatura convexa.	64
Fig. 2.17. Diseño de difusión sonora en el Auditorio de Poitiers (Théâtre Auditorium de Poitiers – TAP), Francia. (http://www.flickr.com/)	66
Fig. 2.18. Ejemplo de aplicación de difusores marca Auralex, tipo <i>WavePrism</i> . (http://www.auralexelite.com/)	66
Fig. 2.19. Se observa como una onda sonora incide sobre una barrera contra el ruido. (A) En frecuencias altas el sonido se atenúa satisfactoriamente hacia el otro lado, mientras que (B) a frecuencias bajas el sonido se atenúa menos debido a la alta difracción cuando incide contra el muro. El sonido pasa justo arriba de la barrera y la envuelve pasando hacia el otro lado. (Adaptada de: Everest y Pohlmann 2009, p. 110)	67
Fig. 2.20. Difracción de ondas sonoras causadas por aberturas.	68
Fig. 2.21. Proceso de absorción acústica. (Adaptada de: Arau, 1999, p. 175)	68
Fig. 2.22. Modos propios de dos espacios distintos, uno rectangular (a) y el otro cúbico (b). (Carrión, 1998, p. 57)	72
Fig. 2.23. Relaciones óptimas entre longitud, anchura y altura (de 1m) de un espacio para evitar resonancias. (Carrión, 1998, p. 58).	72
Fig. 3.1. Ejemplo de una curva ETC medida en algún punto de un recinto. (Carrión, 1998, p. 51)	77
Fig. 3.2. Ejemplo de curva de decaimiento con cálculo de T_{20} y T_{30} .	78
Fig. 4.1. Proceso de absorción sonora. (Adaptada de: Everest y Pohlmann, 2009, p. 180)	85
Fig. 4.2. Materiales absorbentes como fibras de vidrio, lanas de roca y espumas de poliuretano. (http://www.owenscorning.com/ , http://www.itp.eu/ , http://www.jomaro.com.ar/ y http://www.pinta-acoustic.com/)	89
Fig. 4.3. Curva de absorción representativa del Grupo 1. (Arau, 1999, p. 178)	90
Fig. 4.4. Materiales absorbentes con recubrimiento, tales como láminas de plástico, metálicas y membranas acústicas. (http://www.acousticalceilingtiles.com/ , http://www.fiberglasscolombia.com/ y http://www.certainteed.com/)	91
Fig. 4.5. Curva de absorción representativa del Grupo 2. (Arau, 1999, p. 178)	91
Fig. 4.6. Ejemplo de paneles montados a un muro a través de una estructura metálica o de madera, dejando una cámara de aire entre el muro y el panel. La cámara de aire puede recubrirse con material absorbente. (http://www.drywall.com.ve/ , http://www.rockwool.es/ , http://www.ebawe.de/es/ y http://www.mundohi-fi.com/)	92
Fig. 4.7. Curva de absorción representativa del Grupo 3. (Arau, 1999, p. 179)	93
Fig. 4.8. Esquema de un resonador múltiple. (Adaptada de: Carrión, 1998, p. 96)	94
Fig. 4.9. Paneles y resonadores Hellmholtz con perforaciones diversas con revestimiento de material	94

absorbente. (http://www.decustik.com/ , http://www.flickr.com/ , http://www.banema.pt/)	
Fig. 4.10. Curva de absorción representativa del Grupo 4. (Arau, 1999, p. 179)	95
Fig. 4.11. August Kundt. (http://es.wikipedia.org/)	97
Fig. 4.12. Esquema tubo de impedancias. (Adaptada de: Norma ASTM E1050 – 98, p. 6)	97
Fig. 4.13. Representación de la máxima y mínima presión o amplitudes dentro de un tubo de impedancias.	98
Fig. 4.14. Aparatos para medir propiedades acústicas de materiales porosos, basados en el tubo de Kundt.	99
Fig. 4.15. Tubo de impedancias comercial de la marca Acupro. (http://www.alava-ing.es/)	101
Fig. 4.16 y 4.17. Cámara reverberante de la Universidad de Salford. (http://www.flickr.com/)	103
Fig. 4.18 y 4.19. Acomodo de muestras para su medición por parte de Müller-BBM. (http://www.muellerbbm.com/)	104
Figura 4.20. Ejemplo de una cámara reverberante en miniatura. (Silva et al. 2008)	108
Fig. 4.21. Esquema del montaje para la obtención de la resistencia al flujo. (Juliá et al. 2006)	108
Fig. 5.1. Metodología empleada para el desarrollo del experimento.	115
Fig. 5.2. Componentes del tubo de impedancias.	118
Fig. 5.3. Sección recomendable del tubo: (a) circular y (b) rectangular.	119
Fig. 5.4. Largo del tubo y separación entre la fuente sonora y el micrófono más cercano.	120
Fig. 5.5. Orificio de desfogue.	120
Fig. 5.6. Porta muestras: (a) integrado al tubo y (b) como una extensión del tubo.	121
Fig. 5.7. Acoplamiento con empaque de caucho o silicón.	121
Fig. 5.8. Respaldo de la muestra.	122
Fig. 5.9. Acoplamiento entre tubo y fuente sonora.	122
Fig. 5.10. Porta micrófonos.	123
Fig. 5.11. Sellamiento de los porta micrófonos.	123
Fig. 5.12. Distancia entre la muestra de material y micrófono más cercano: (x) para superficies lisas, (y) para superficies no homogéneas y (z) para superficies asimétricas.	124
Fig. 5.13. Diafragma del micrófono ubicado a ras de la superficie interna del tubo.	125
Fig. 5.14. Tubo hidráulico honeado.	125
Fig. 5.15. Cromado de la cara interna del tubo.	126
Fig. 5.16. Tubo de impedancias final.	131
Fig. 5.17. Equipo e instrumentos complementarios. (Adaptada de: ASTM E1050 – 98)	132
Fig. 5.18 y 5.19. Computadora de escritorio y portátil. (http://www.pc-offices.com/ , http://news.idealco.uk/)	133
Fig. 5.20. Generador de funciones <i>Agilent</i> , modelo 33210A. (Imagen tomada del manual de <i>National Instruments</i>)	134
Fig. 5.21. Amplificador de potencia <i>Crest Audio</i> , modelo HD4. (http://www.liveline.be/)	135
Fig. 5.22. Driver <i>B&C SPEAKERS</i> , modelo DE900TN. (http://www.bcspeakers.com/)	135
Fig. 5.23. Micrófono de presión de ½" G.R.A.S., tipo 40AP. (Imagen tomada del manual de G.R.A.S)	136
Fig. 5.24. Preamplificador de ½" <i>Norsonic</i> . (http://img.directindustry.com/)	136

Fig. 5.25. Tarjeta PCI-GPIB+488.2 <i>National Instruments</i> . (http://sine.ni.com/)	137
Fig. 5.26. Tarjeta GPIB-USB-HS <i>National Instruments</i> . (Imagen tomada del manual de <i>National Instruments</i>)	137
Fig. 5.27. Cable GPIB <i>National Instruments</i> . (http://www.linearx.com/)	138
Fig. 5.28. Analizador en tiempo real <i>Norsonic</i> , modelo 840.	139
Fig. 5.29. Ventana de Inicio del <i>software Medición Tubo 2.92</i> .	140
Fig. 5.30. Menú <i>Medir</i> .	141
Fig. 5.31. Ventana para realizar una calibración del tubo de impedancias.	142
Fig. 5.32. Ventana para realizar una nueva medición.	143
Fig. 5.33. Ejemplo de introducción de datos para realizar una medición con Unicel.	143
Fig. 5.34. Ventana que muestra la gráfica del comportamiento del coeficiente de absorción sonora de un material.	144
Fig. 5.35. Menú <i>Consultar</i> .	145
Fig. 5.36. Ventana de consulta.	145
Fig. 5.37. Cortadora Laser de la UAM-Azc.	146
Fig. 5.38. Corte de muestras de madera balsa.	147
Fig. 5.39. Colocación de muestra en el porta muestras.	147
Fig. 5.40. Diagrama del proceso de medición para la obtención del coeficiente de absorción sonora.	148
Fig. 5.41 a 5.43. Muestras de fibras de vidrio y lanas minerales.	149
Fig. 5.44. Muestra <i>Deco Sky</i> .	149
Fig. 5.45. Muestra <i>QuietR AcousticR</i> .	151
Fig. 5.46. Muestra Serie 700 <i>Fiberglas</i> .	152
Fig. 5.47. Muestra <i>QuietR Duct Board</i> .	153
Fig. 5.48. Muestra Fibra Mineral <i>Rolan</i> .	154
Fig. 5.49. Gráfica de coeficientes de absorción sonora MDF 12 mm (Ventana resultados en <i>software Medición Tubo 2.92</i>).	156
Fig. 5.50. Gráfica de coeficientes de absorción sonora Cartón Corrugado 2 caras, 4 mm (Ventana resultados en <i>software Medición Tubo 2.92</i>).	157
Fig. 5.51. Gráfica de coeficientes de absorción sonora Corcho 5 mm (Ventana resultados en <i>software Medición Tubo 2.92</i>).	157
Fig. 5.52. Gráfica de coeficientes de absorción sonora Espuma de Poliuretano Suave 24 FME, 12 mm (Ventana resultados en <i>software Medición Tubo 2.92</i>).	158
Fig. 5.53. Gráfica de coeficientes de absorción sonora Espuma de Poliuretano Suave 50 RF, 12 mm (Ventana resultados en <i>software Medición Tubo 2.92</i>).	158
Fig. 5.54. Proporciones resultantes para el modelo físico a escala. (Adaptada de: Carrión, 1998, p. 58)	165
Fig. 5.55. Proporciones y volumen del espacio propuesto.	165
Fig. 5.56. Modos propios del espacio propuesto.	166
Fig. 5.57. Materiales seleccionados para su comprobación en el modelo a escala: (a) MDF, (b) Cartón Corrugado, (c) Corcho, (d) Espuma de Poliuretano Suave 24 FME y (e) Espuma de Poliuretano Suave 50 RF.	167

Fig. 5.58. Corte de piezas del modelo.	167
Fig. 5.59. Ensamble de piezas.	168
Fig. 5.60. Perforación de orificios.	168
Fig. 5.61. Sellado de la tapa.	168
Fig. 5.62. Fuente en miniatura.	170
Fig. 5.63. Micrófono para campo libre de ¼" G.R.A.S., tipo 40BF. (Imagen tomada del manual de G.R.A.S)	171
Fig. 5.64. Ventana de Inicio del <i>software RT</i> .	173
Fig. 5.65. Menú <i>Inicio</i> .	173
Fig. 5.66. Menú <i>Configurar</i> .	174
Fig. 5.67. Menú <i>Consultar</i> .	175
Fig. 5.68 a 5.70. Configuración de la medición.	176-177
Fig. 5.71. Resultados en formato .txt.	177
Fig. 5.72. Posición de las mediciones y rango de cobertura.	179
Fig. 5.73 a 5.77. Modelo a escala con material base (MDF), cartón corrugado, corcho y espumas de poliuretano suave (24 FME y 50 RF).	180
Fig. 5.78. Ubicación y direccionalidad de la fuente y micrófono en el modelo a escala 1:10.	181
Fig. 5.79. Diagrama del proceso de medición para la obtención del tiempo de reverberación.	182
Fig. 5.80. Comparación entre los tiempos de reverberación de los diferentes casos obtenidos en el modelo físico a escala.	183
Fig. 5.81. Generación del modelo en Auto CAD.	184
Fig. 5.82. Ventana editada para espacio de MDF.	185
Fig. 5.83. Ventana editada para espacio de MDF combinado con una superficie con cartón corrugado.	186
Fig. 5.84 a 5.88. Visualización de todos los espacios propuestos.	186-187
Fig. 5.89. Ubicación y direccionalidad de la fuente y receptor en el modelo virtual.	188
Fig. 5.90. Ventana de configuración de la medición.	189
Fig. 5.91. Comparación entre los tiempos de reverberación obtenidos en el modelo a escala.	190
Fig. 6.1. Gráfica comparativa del RT por simulaciones con MDF.	193
Fig. 6.2. Gráfica comparativa del RT por simulaciones con MDF y cartón corrugado.	194
Fig. 6.3. Gráfica comparativa del RT por simulaciones con MDF y corcho.	195
Fig. 6.4. Gráfica comparativa del RT por simulaciones con MDF y espuma de poliuretano suave, 24 FME.	196
Fig. 6.5. Gráfica comparativa del RT por simulaciones con MDF y espuma de poliuretano suave, 50 RF.	197
Fig. 6.6 a 6.10. Error relativo del RT entre simulaciones.	199
Fig. 6.11. Resultados del coeficiente de absorción sonora e impedancia acústica de materiales utilizados en la construcción. (Alba et al. 2006)	202
Fig. 6.12. Resultados obtenidos de diferentes parámetros de calidad acústica entre el espacio real (modalidad de concierto ● y opera ○) y el modelo físico a escala (modalidad de concierto ■ y opera □). (Adaptada de: Yong et al. 2008, p. 623)	204
Fig.6.13. Gráfica comparativa del RT por simulación por computadora del modelo físico a escala.	205

Fig. 6.14. Gráfica comparativa del RT entre la simulación del modelo físico a escala por computadora (A) y la aplicación de la fórmula de Sabine para el modelo físico a escala (B).	206
Fig. 6.15. Gráfica comparativa del RT entre la simulación del modelo físico a escala por computadora (A) y el espacio real por simulación por computadora (B).	207
Fig. 6.16. Coeficientes de absorción sonora obtenidos por diferentes métodos para materiales como: (a) corcho aglomerado negro, (b) espuma de poliuretano, (c) fibra de coco en placa y (d) fibra de coco en rollo. (Adaptada de: Silva et al. 2008)	209
Fig. 6.17. Coeficientes de absorción sonora obtenidos por el método de tubo impedancias de diferentes muestras: (a) lana de vidrio de 87.5 cm de diámetro, (b) fieltro de 87.5 cm de diámetro, (c) lana de vidrio de 87.0 cm de diámetro y (d) fieltro de 87.0 cm de diámetro. (Adaptada de: Kino y Ueno, 2006)	211
Fig. 6.18. Efecto de resonancia del coeficiente de absorción sonora de un cartón batería de 1 mm de espesor.	213

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de frecuencias según Llinares et al. (Adaptada de: Llinares et al. 2008, p. 113)	55
Tabla 2.2. Bandas de octava expresadas en Hertz (Hz).	56
Tabla 2.3. Niveles de presión sonora de diversas fuentes sonoras. (Carrión, 1998, p. 35)	57
Tabla 2.4. Ejemplo de coeficientes de absorción sonora de algunos materiales (http://sonoflex.com/fonac/)	69
Tabla 3.1. Márgenes de valores recomendados de RT_{mid} en función del tipo de sala (recintos ocupados). (Carrión, 1998, p. 64)	79
Tabla 4.1. Ejemplo de coeficientes de absorción sonora de algunos materiales comunes en la construcción, mobiliario y personas. (Datos tomados de: Arau (1999, p.190 - 192)	87
Tabla 4.2. Tiempo de reverberación en una cámara reverberante. (Adaptada de: Pérez, 1989)	102
Tabla 4.3. Requerimientos para la realización de una cámara reverberante en miniatura escala 1:8. (Adaptada de: Spring et al., BBC, 1971)	107
Tabla 5.1. Valores del coeficiente de absorción del material <i>Deco Sky</i> , proporcionados por la empresa.	150
Tabla 5.2. Valores del coeficiente de absorción del material <i>Deco Sky</i> , medidos en tubo de impedancias.	150
Tabla 5.3. Valores del coeficiente de absorción del material <i>QuietR AcousticR</i> , proporcionados por la empresa.	151
Tabla 5.4. Valores del coeficiente de absorción del material <i>QuietR AcousticR</i> , medidos en tubo de impedancias.	151
Tabla 5.5. Valores del coeficiente de absorción del material <i>Serie 700 Fiberglas</i> , proporcionados por la empresa.	152
Tabla 5.6. Valores del coeficiente de absorción del material <i>Serie 700 Fiberglas</i> , medidos en tubo de impedancias.	152
Tabla 5.7. Valores del coeficiente de absorción del material <i>QuietR Duct Board</i> , proporcionados por la empresa.	153
Tabla 5.8. Valores del coeficiente de absorción del material <i>QuietR Duct Board</i> , medidos en tubo de impedancias.	153
Tabla 5.9. Valores del coeficiente de absorción de fibra mineral de <i>Rolan</i> , proporcionados por la empresa.	154
Tabla 5.10. Valores del coeficiente de absorción de fibra mineral de <i>Rolan</i> , medidos en tubo de impedancias.	154
Tabla 5.11. Coeficientes de absorción sonora de materiales comúnmente utilizados en modelos a escala.	160-161
Tabla 5.12. Resultados finales del RT obtenidos en el modelo físico a escala.	182
Tabla 5.13. Resultados finales del RT obtenidos en el modelo de simulación por computadora.	190
Tabla 6.1. Comparación de frecuencias en cada caso.	192
Tabla 6.2. Comparativa del RT por simulaciones con MDF.	193
Tabla 6.3. Comparativa del RT por simulaciones con MDF y cartón corrugado.	194
Tabla 6.4. Comparativa del RT por simulaciones con MDF y corcho.	194

Tabla 6.5. Comparativa del RT por simulaciones con MDF y espuma de poliuretano suave, 24 FME.	195
Tabla 6.6. Comparativa del RT por simulaciones con MDF y espuma de poliuretano suave, 50 RF.	196
Tabla 6.7. Materiales medidos, empleados en la construcción. (Alba et al. 2006)	201
Tabla 6.8. Resultados del tiempo de reverberación obtenidos en el espacio real, en el modelo físico a escala y en las simulaciones por computadora. (Adaptada de: Yong et al. 2008, p. 623)	203
Tabla 6.9. RT del modelo físico a escala por simulación por computadora.	205
Tabla 6.10. Comparación del RT entre la simulación del modelo físico a escala por computadora (A) y la aplicación de la fórmula de Sabine para el modelo físico a escala (B).	206
Tabla 6.11. Comparación del RT entre la simulación del modelo físico a escala por computadora (A) y el espacio real por simulación por computadora (B).	207

ÍNDICE DE EXPRESIONES

Ecuación 2.1. Velocidad del sonido según Pierre Simón de Laplace.	52
Ecuación 2.2. Nivel de presión sonora.	56
Ecuación 2.3. Cálculo de los modos propios según Rayleigh.	71
Ecuación 3.1. Ecuación de Sabine para determinar el tiempo de reverberación.	75
Ecuación 4.1. Coeficiente de absorción sonora.	85
Ecuación 4.2. Cálculo para la absorción equivalente a una cámara reverberante vacía.	104
Ecuación 4.3. Cálculo para la absorción equivalente a una cámara reverberante con material adentro.	104
Ecuación 4.4. Cálculo del coeficiente de absorción sonora en una cámara reverberante.	105
Ecuación 5.1. Frecuencia máxima para un tubo de impedancias.	127
Ecuación 5.2. Espesor del tubo de impedancias.	127
Ecuación 5.3. Relación de espesor entre el diámetro interno y externo del tubo de impedancias.	128
Ecuación 5.4. Espaciamiento entre micrófonos.	130
Ecuación 5.5. Determinación de los modos propios del modelo físico a escala según Rayleigh.	166
Ecuación 5.6. Distancia mínima entre la fuente sonora y micrófono.	178

INTRODUCCIÓN

Introducción

El presente trabajo surge a partir de la necesidad del Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico (LADAc) del Departamento de Procesos y Técnicas de Realización de la Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, en poder lograr la caracterización de la absorción sonora en modelos físicos a escala.

LADAc desarrolla investigación en el campo de la acústica arquitectónica, enfocándose fundamentalmente al uso de modelos de simulación para la predicción acústica de los espacios arquitectónicos. En relación a la acústica de recintos, Gonchar (2011) señala que de todas las propiedades físicas de un espacio, como es la forma, los colores, las texturas, la iluminación, entre otras, la acústica, es la única propiedad que tiene la habilidad de influir en nuestra apreciación espacial de cualquier recinto.

Uno de los métodos que se utilizan en el LADAc es la simulación acústica a través de modelos físicos a escala; por tal motivo, los datos que esta investigación aporte serán de gran utilidad para el desarrollo de investigaciones en relación al comportamiento acústico de los espacios arquitectónicos donde la absorción sonora sea fundamental.

Como colaboradora en trabajos de vinculación profesional en el LADAc, observo que cada vez hay una mayor preocupación por mejorar las condiciones de aislamiento y acondicionamiento acústico de los espacios. Por ello es importante contar con las herramientas y conocimientos necesarios para brindar soluciones significativas.

En relación a lo anterior, puede decirse que una de las motivaciones personales para abordar este tema, surge como un reto ante la necesidad de poder explicar y entender el comportamiento de los materiales absorbentes o bien el fenómeno de la absorción sonora en modelos físicos a escala; para nosotros los arquitectos, y en particular para las necesidades del LADAc, tanto en el campo de la docencia como en el de la práctica profesional.

La presente investigación se estructuró de acuerdo al método de investigación que plantea el Dr. Gerardo G. Sánchez Ruiz (2004), el cual se refiere a un proceso de lógica para iniciar un trabajo de búsqueda o investigación. Dicho proceso sugiere la definición del planteamiento del

problema, el cual posee dos aspectos fundamentales: la enunciación del problema y las características del mismo; posterior a esto deben generarse hipótesis a la problemática, las cuales son enunciaciones que tratan de explicar el porqué del problema; y por último deben plantearse objetivos que son los que dan pie a las acciones de investigación a realizar para intentar resolver el problema.

Planteamiento del problema

En investigaciones de maestría previas de Luz del Carmen González (2009) y Elisa Garay Vargas (2010), se comparó el tiempo de reverberación (RT) entre modelos virtuales y modelos físicos a escala de diversos espacios arquitectónicos; así mismo se experimentó con materiales y superficies reflejantes, difusoras y absorbentes; sin embargo los resultados del RT obtenidos entre ambos modelos (físicos y virtuales) con materiales absorbentes, fueron muy distintos a los esperados y se consideraron no válidos.

Por lo anterior, se llegó a la conclusión de que los materiales absorbentes utilizados en escalas reales no sirven para modelos o maquetas a diferente escala. Esto conllevó a la necesidad de estudiar el fenómeno de la absorción sonora más a fondo

Hipótesis principal

Para explicar el porqué del problema, se plantearon algunas hipótesis, tanto principales como particulares:

- La causa por la que no puedan realizarse mediciones confiables en modelos físicos a escala con materiales absorbentes utilizados en escalas reales, se debe a que las características físicas del material, del sonido y de las condiciones del espacio; no pueden, ni deben ser las mismas a diferentes escalas, y por lo tanto las características acústicas como el coeficiente de absorción sonora es diferente.
- Las características de la absorción de los materiales absorbentes dependen no sólo de sus propiedades físicas, sino también en gran parte de un sinnúmero de condicionantes y de detalles constructivos, que varían sustancialmente de un caso a otro y que no se pueden

representar mediante una expresión matemática. Es por ello que, para realizar cualquier diseño acústico, resulta imprescindible disponer de los coeficientes de absorción α obtenidos mediante ensayos de laboratorio, según un procedimiento homologado (norma ISO 354/UNE-EN 20354¹), (Carrión, 1998, p.72).

Hipótesis particulares

- Hoy día no existe una relación de materiales que puedan simular diversos coeficientes de absorción sonora en frecuencias altas para aplicarse en modelos físicos a escala. Generalmente los datos de absorción sonora se presentan entre los 125 Hz y los 4 000 Hz y quedan fuera las frecuencias altas de 5 000 Hz en adelante, las cuales se utilizan en modelos a escala.
- Las características del sonido no pueden ni deben ser las mismas en diferentes escalas a sus diferentes frecuencias de sonido, ya que el sonido de una frecuencia determinada se caracteriza por ser una vibración periódica, es decir, es un fenómeno que se repite en intervalos de tiempo iguales².
- Las condiciones del espacio en las que se realizan las mediciones pueden manipular los resultados, cambiarlos o interferir con ellos. Por lo que, si las mediciones se realizan en un espacio reverberante, éste afectará el número de reflexiones y si se realiza en un espacio absorbente, el tiempo de reverberación resultará bajo y no habrá reflexiones.

Objetivo principal

Para cada hipótesis se planteó un objetivo:

- Hacer un análisis de las características físicas de los materiales, de las características de la fuente sonora y de las condiciones espaciales en las que se realizan los

¹ Norma que habla de la medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.

² Por ejemplo, un sonido de 10 Hz sólo produce en el oído humano 10 vibraciones o perturbaciones en un segundo, lo que significa que una frecuencia más alta producirá mayor perturbación y viceversa en una más baja. (Arau, 1999)

experimentos que originan que no funcionen. También es necesario analizar los conceptos que determinan las características acústicas de un espacio arquitectónico. Esto con el fin de proponer alternativas de materiales que simulen a los empleados en escalas reales y fuentes sonoras escalables.

Objetivos particulares

- Indagar en coeficientes de absorción sonora de diversos materiales en las frecuencias de 5 kHz y 10 kHz que sean comparables con los coeficientes de materiales en frecuencias de 500 Hz y 1 kHz, y así generar una base de datos para la simulación de la absorción sonora en modelos a escala. Para ello se utilizará el método de tubo de Kundt o de impedancia³ por su facilidad de uso y requerimiento de poco espacio para su manipulación.
- Hacer una investigación de cómo se han escalado las fuentes de sonido a sus diferentes bandas de frecuencia para diferentes escalas. Se pretende utilizar un generador de funciones para transformar frecuencias inaudibles para el ser humano, a través de un amplificador, y éste a su vez a una bocina.

Es necesario conocer el procedimiento para caracterizar una fuente sonora en miniatura. Una forma de desarrollarlo, es utilizando un método gráfico para representar la directividad mediante un diagrama polar⁴.

- Realizar un estudio de las condiciones físicas, características y parámetros acústicos del espacio a las que son sometidos los modelos físicos a escala para definir si es un espacio reverberante, absorbente, difuso o un ambiente controlado, y valorar si son las más adecuadas o no.

³ El tubo de impedancias permite medir el coeficiente de absorción de los materiales de construcción mediante la utilización de muestras. Éste consiste básicamente en un conducto con una fuente de sonido en un extremo y un porta muestras en el otro.

⁴ Un diagrama polar es un dibujo técnico que refleja la radiación de una fuente sonora en el espacio en grados para cada punto de sus ejes (horizontal y vertical).

Estructura de la tesis

Una vez planteadas las hipótesis y los objetivos, tanto principales como particulares, se realizó la propuesta del capitulado que fue modificándose conforme avanzó la investigación. El capitulado final quedó de la siguiente forma.

- **Introducción.**
- **Capítulo 1. Estado del conocimiento.**
- **Capítulo 2. Fundamentos teóricos de acústica arquitectónica.**
- **Capítulo 3. Tiempo de reverberación y otros parámetros de calidad acústica.**
- **Capítulo 4. La absorción sonora y otras propiedades acústicas.**
- **Capítulo 5. Planteamiento del problema y desarrollo del experimento.**
- **Capítulo 6. Discusión y análisis de resultados.**
- **Capítulo 7. Conclusiones.**

En la presente **Introducción**, se señalan: el planteamiento del problema, las hipótesis y los objetivos de la tesis; también se describe la estructura metodológica de la misma.

En el **Capítulo 1. Estado del conocimiento**, se describe la forma de representar la arquitectura a partir de modelos físicos a escala. También se hace un recorrido histórico en materia de los métodos de diseño para la simulación acústica de recintos, centrando la atención en la simulación de la absorción sonora en modelos físicos a escala.

En el **Capítulo 2. Fundamentos teóricos de acústica arquitectónica**, se definen conceptos y principios básicos de Acústica. También se describe el comportamiento del sonido en los espacios arquitectónicos, así como los fenómenos que ocurren dentro de ellos.

En el **Capítulo 3. Tiempo de reverberación y otros parámetros de calidad acústica**, se desarrolla con mayor profundidad el concepto de tiempo de reverberación y el por qué es considerado un parámetro que define la calidad acústica de los espacios. También se definen de manera muy general otros parámetros de calidad acústica.

En el **Capítulo 4. La absorción sonora y otras propiedades acústicas**, se desarrollan conceptos y principios en relación a la absorción sonora. Asimismo se define qué es un coeficiente de absorción sonora, los métodos para su obtención y medición, enfocándose en el método de tubo de impedancias. También se describen de manera general otras propiedades acústicas.

En el **Capítulo 5. Planteamiento del problema y desarrollo del experimento**, se describen las etapas del proceso del experimento, las cuales incluyen: la obtención del coeficiente de absorción sonora de los materiales, la comprobación de la absorción sonora en un modelo físico a escala y en un modelo de simulación por computadora.

En el **Capítulo 6. Discusión y análisis de resultados**, se discuten y analizan los resultados obtenidos durante el experimento.

En el **Capítulo 7. Conclusiones** se presentan las conclusiones puntuales en relación al desarrollo del experimento de este trabajo, así mismo, se exponen líneas futuras de investigación en las cuales se pretende continuar trabajando.

Durante el proceso del desarrollo de esta investigación se indagó en un gran número de artículos de investigación en relación a la caracterización de la absorción sonora en modelos físicos a escala y en relación a los métodos para la obtención del coeficiente de absorción sonora de los materiales. Correspondiente a este último tema, la mayoría de los artículos hacen referencia a la medición del coeficiente de absorción sonora de los materiales a partir del método de cámara reverberante, sin encontrarse alguno que empleara el método de tubo de impedancias. Es por ello que esta investigación hace una propuesta distinta e interesante para la obtención de coeficientes de absorción sonora de materiales empleados en modelos físicos a escala.

Vinculado a lo anterior, conviene señalar que realmente ningún artículo hace una propuesta clara de cuales materiales pudieran simular los empleados en un espacio real en un modelo físico a escala. Sin embargo, todos ellos dejan claro el impredecible comportamiento de los materiales absorbentes.

En relación a los resultados obtenidos en esta investigación, éstos se consideraron sumamente distintos a los esperados y por lo tanto se realizó una búsqueda exhaustiva para intentar explicar dicha situación. La búsqueda involucró el análisis concienzudo de las discusiones y conclusiones de varios artículos de investigación con semejanza en el tema.

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

1. Estado del conocimiento

En este primer capítulo se abordan de manera general los métodos de diseño que se han empleado en la acústica arquitectónica, así como los procesos que se han utilizado para la simulación acústica de recintos, centrando la atención en la simulación de la absorción sonora y los modelos físicos a escala.

Antes de comenzar a describir los modelos físicos a escala empleados en la arquitectura, se abordará el concepto de “modelo”, término esencial para esta investigación.

Rodríguez (2011) señala que los modelos son representaciones de fenómenos concernientes a la realidad y se dan en distintas ciencias del conocimiento, como en las sociales, físicas, naturales, filosofía, psicología y diseño. Enlista una gran variedad de conceptos relacionados con la palabra “modelo”, por mencionar algunos: modelos computacionales, modelos económicos, modelos didácticos, modelos teóricos, modelos matemáticos, modelos a escala, entre otros. Sin embargo, apunta que a pesar de ser muchos, éstos pueden reducirse al hecho de que todos tratan de representar problemas de diversa índole.

Por otra parte, Rodríguez (2011) se refiere a Frigg y Hartmann (2006), para intentar describir qué son realmente los modelos, cómo funcionan, qué se entiende y qué se aprende a través de ellos. En relación a ello, señala que los modelos pueden llevar a cabo dos funciones principalmente: representar una parte escogida del mundo o representar una teoría desde el punto de vista de sus leyes. Así mismo, menciona que estas representaciones pueden interpretarse de diferente forma, según el área o campo de conocimiento. En este punto, alude al siguiente ejemplo, “... un modelo matemático de la propagación del sonido en el espacio podrá ser totalmente ininteligible para un arquitecto; pero eso no será así si se representa mediante el uso de un modelo físico a escala.” (p. 5-3).

En relación a lo anterior, Frigg y Hartmann (2006) describen un modelo físico a escala como: copias reducidas o agrandadas del sistema que se quiere revisar, resolver o describir. Representa una réplica naturalista o imagen verdadera del sistema, son referidos también como “modelos verdaderos”.

Además, Rodríguez (2011) indica que con los modelos se aprende acerca del mundo, pues pueden representarse aspectos significativos a través de ellos. Así mismo menciona que éstos pueden considerarse como nuevos estilos de razonamiento.

A continuación se aborda dentro del tema de la arquitectura, sus formas de representación, con objeto de contextualizar el estudio de esta investigación el cual está enfocado a resolver problemas de arquitectura.

1.1. Modelos físicos a escala en arquitectura

Desde la antigüedad, los modelos físicos a escala, también llamados maquetas, se han empleado para representar de manera física y a escala reducida o ampliada (dependiendo el caso) algún elemento. Específicamente en el campo de la arquitectura, los modelos físicos a escala son una representación física a una escala reducida de algún espacio, edificio o partes del mismo o un proyecto urbano, entre otros.

Es importante mencionar que los modelos físicos a escala también constituyen un medio de representación arquitectónica, al igual que el dibujo, por lo que se utilizan paralelamente en la descripción y desarrollo de algún proyecto arquitectónico. Con este medio se puede traducir un dibujo en un modelo tridimensional, con el cual pueden analizarse y estudiarse los volúmenes, formas, colores, texturas y espacios proyectados por el arquitecto.

Dentro del campo de la arquitectura, los modelos físicos a escala también se han empleado para describir las características de un espacio en relación a los efectos de la luz, viento y sonido, considerándose herramientas para la simulación de estos aspectos. Debido al enfoque de esta investigación, el tema es el de la simulación acústica de recintos y más adelante se profundizará más con relación a los modelos físicos a escala.

1.1.1. Clasificación tipológica

Knoll (2001) señala que los modelos físicos a escala se basan en una reducción de los elementos tectónicos básicos, como son: cuerpos o volúmenes y superficies.

Este autor hace una clasificación tipológica de los modelos físicos a escala en:

- **Maquetas topográficas:** este tipo de modelos se utilizan para reproducir un terreno, un jardín, o un paisaje natural, ya sea existente o diseñado (fig. 1.1 a 1.3). En este tipo de modelos, se pueden encontrar reproducciones en relación a la vegetación, características topográficas y de forma del terreno, edificación existente, mobiliario y equipamiento urbano.

La escala para trabajar este tipo de modelos es relativa. Los modelos de terrenos y paisajes se trabajan en escalas pequeñas, tales como: 1:500, 1:1000, 1:2500 o más. Por otro lado, los modelos de jardines se trabajan a una escala mayor, debido al grado de detalle requerido. Las escalas sugeridas son: 1:200, 1:100, 1:50 o menos.

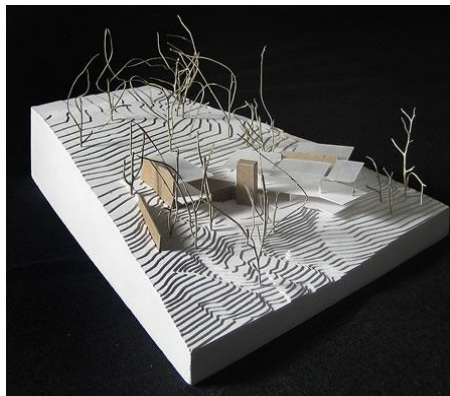


Fig. 1.1. Modelo físico a escala de un terreno. (<http://archiseek.com/>)



Fig. 1.2. Modelo físico a escala de un paisaje (Charlotte, Carolina del Norte, EE. UU.).
(<http://www.howardmodels.com/>)



Fig. 1.3. Modelo físico a escala de un jardín (Jardín de la azotea del Centro Médico de San Lucas, California, EE. UU.). (<http://www.russellmillsstudios.com/>)

- **Maquetas de edificación:** en esta clasificación entra una amplia variedad de modelos, tales como: urbanismo, edificios, estructuras, espacios interiores y detalles; en fin, todos aquellos modelos que representen una parte o la totalidad de un edificio (fig. 1.4 a 1.8).

Con este tipo de modelos se puede reproducir el espacio urbano (plazas, calles y edificios), los elementos significativos de un edificio (fachadas y cubiertas), así como su configuración. También puede reproducirse la estructura de un edificio, el interior de un espacio (funciones espaciales, mobiliario, materiales, colores y texturas). Por último, pueden representarse detalles de alguna sección del edificio, como una escalera por ejemplo.

Las escalas de trabajo para este tipo de modelos son igualmente variables. Pueden ir desde 1:10 a 1:500.



Fig. 1.4. Modelo físico a escala de un proyecto urbano (Distrito de Victoria, Milán, Italia). (<http://www.oneoff.it/>)



Fig. 1.5. Modelo físico a escala de un edificio (Proyecto de ampliación de la Escuela Meritxell en Andorra). (<http://www.artkitech.es/>)



Fig. 1.6. Modelo físico a escala de la estructura de una casa, a base de postes y vigas. (<http://www.lapponiaopifex.fi/>)

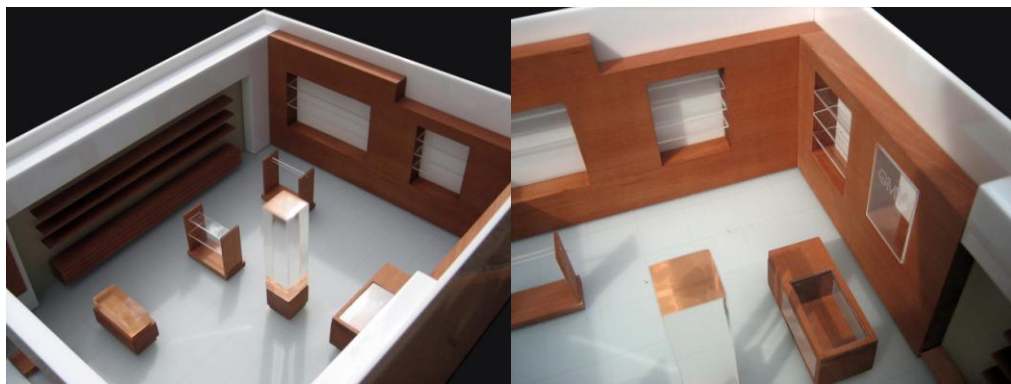


Fig. 1.7. Modelo físico a escala de un espacio interior (Tienda GIAN MARCO VENTURI, Milán, Italia). (<http://www.oneoff.it/>)

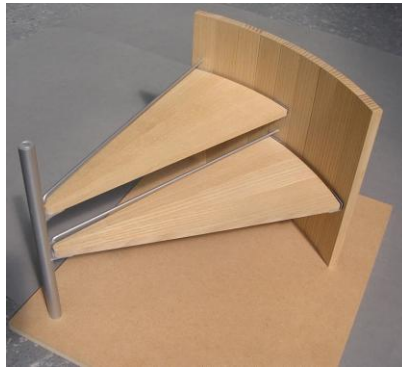


Fig. 1.8. Modelo físico a escala del detalle de una escalera de espiral en madera de roble maciza (Detalle de la escalera de la residencia del Arq. Michael Hopkins). (<http://www.invermodels.co.uk/>)

- **Maquetas especiales:** son modelos de elementos especiales de diseño. En esta tipología es común representar objetos y mobiliario. Las escalas de trabajo son grandes: desde 1:10 a 1:1 (fig. 1.9 y 1.10).



Fig. 1.9. Proceso para la elaboración del modelo físico a escala de unos sillones. (<http://elinabusmane.wordpress.com/>)



Fig. 1.10. Modelo a escala de mobiliario urbano (Diseño de una marquesina para un concurso en Nueva York, EE. UU.). (<http://www.aescalamaquetas.com/>)

Por otra parte, es importante considerar dentro de cada tipología de modelos, el grado de detalle requerido para la elaboración de éstos. En relación a ello, Knoll (2001) señala que ello se puede ubicar en relación a las fases del proyecto. Por ejemplo:

- A nivel anteproyecto: los modelos físicos a escala tienen un carácter conceptual, son un esbozo de la idea básica del proyecto, por lo que representan una primera idea de lo que se quiere transmitir.

No se requiere un nivel de detalle minucioso para realizar estos modelos, requiriendo así, métodos de manufactura sencillos, así como materiales fáciles de moldear y manipular. También pueden utilizarse objetos encontrados, auxiliares para la representación de la idea.

Es importante aclarar que la manufactura de estos modelos requiere de muy poco tiempo para su elaboración.

- A nivel proyecto: los modelos representan la idea o proyecto con mayor formalidad. Requieren un nivel de detalle más elevado, por lo que su manufactura requiere mayor elaboración.

En este tipo de modelos se definen con mayor detalle cada uno de los elementos del proyecto, aunque pueden ser modificables. Se describen mejor las formas, el tamaño, las relaciones entre elementos, texturas, colores, entre otros.

Los métodos de manufactura deben ser más precisos, por lo que se requiere mayor tiempo para su elaboración. La elección de los materiales debe acercarse lo más posible a la realidad, de tal forma que correspondan en color, textura, apariencia, entre otros. En relación a esto, los precios en materiales pueden elevarse considerablemente, pues son más específicos y selectivos.

Estos modelos pueden llegar a reflejar el estado final del proyecto, sin embargo, requieren un poco más de detalle para mostrar la apariencia definitiva del mismo.

- A nivel ejecución: los modelos expresan de forma definitiva y precisa los elementos del proyecto, por lo que este tipo de modelos no es modificable en la mayoría de los casos.

Los métodos de manufactura requieren ser sumamente precisos, por lo que demandan demasiado tiempo. Así mismo, los materiales deben poseer características idénticas a los de la realidad.

Las figuras 1.11 a 1.13, muestran el ejemplo de algunos modelos físicos a escala en cada una de las etapas anteriormente señaladas.

En la figura 1.11 se observan tres modelos topográficos en diferentes etapas. Dichos modelos muestran las características físicas del entorno, los edificios existentes y los propuestos en el proyecto.

En el caso de la figura 1.12 se observan modelos de proyectos urbanos, en los cuales se describe la estructura morfológica del entorno, la imagen urbana del mismo, entre otros aspectos.

Finalmente, en la figura 1.13 se muestran distintos modelos de edificios. En dichos modelos se describe la forma y estructura del edificio, también se definen los materiales, colores y texturas del mismo.

Puede notarse un incremento en el grado de detalle (manufactura, materiales, colores, entre otros) en cada uno de los modelos en relación a la etapa requerida.

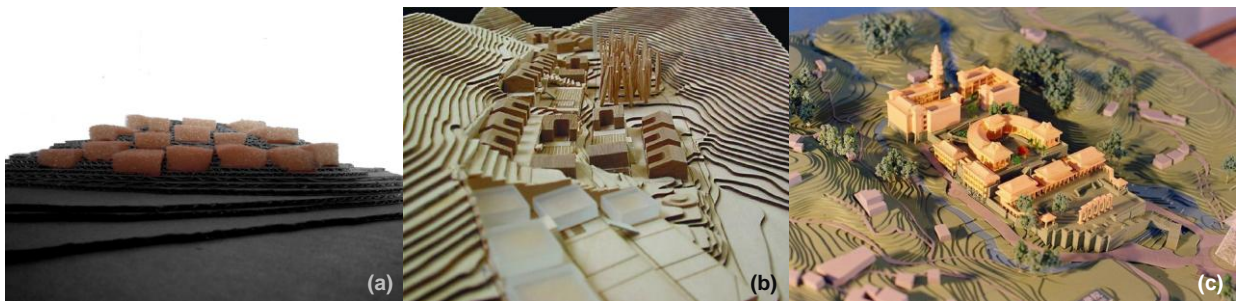


Fig. 1.11. Modelos topográficos en diferentes etapas: (a) nivel anteproyecto, (b) nivel proyecto y (c) nivel ejecución. (a) (<http://p7mariaeliceguiucjc.blogspot.mx/>), (b) y (c) (<http://www.archivisionmodels.com/>)

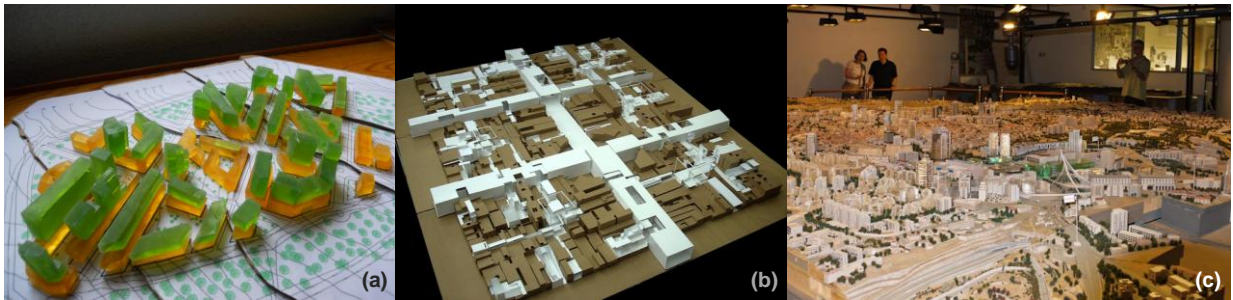


Fig. 1.12. Modelos de proyectos urbanos en diferentes etapas: (a) nivel anteproyecto, (b) nivel proyecto y (c) nivel ejecución. (a) (<http://unidadjantonioortiz.blogspot.mx/>), (b) (<http://eduardoiberico.wordpress.com/>) y (c) (<http://www.myurbanist.com/>)

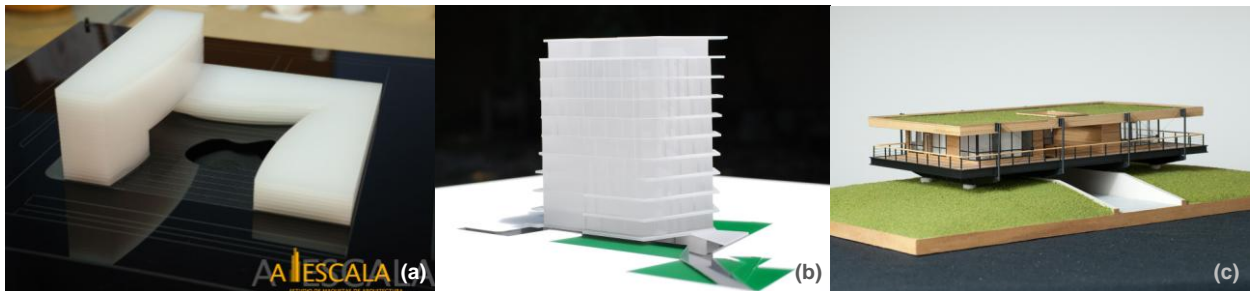


Fig. 1.13. Modelos de edificios en diferentes etapas: (a) nivel anteproyecto, (b) nivel proyecto y (c) nivel ejecución. (a) (<http://www.aescalamaquetas.com/>), (b) (<http://www.oneoff.it/>) y (c) (<http://www.sweetonioncreations.com/projects/>)

1.1.2. Materiales empleados

Como ya se comentó, de acuerdo a la tipología del modelo físico a escala a realizar, así como al grado de detalle o nivel de elaboración requerido, se define el tipo de material a utilizar. Es importante señalar que para la construcción de dichos modelos hay una amplia variedad y diversidad de materiales.

Según lo anterior, se puede hacer una clasificación de los materiales como se indica a continuación, los cuales podrían considerarse como los más comunes para la realización de modelos físicos a escala:

- Papeles, cartulinas y cartones
- Maderas

- Plásticos
- Espumas
- Metales
- Otros (textiles, pinturas, arenas, entre otros)

1.1.2.1. Papeles, cartulinas y cartones

Estos materiales son sin duda los más fáciles de conseguir y manipular y por lo tanto, son los más utilizados para la elaboración de modelos físicos a escala. Es importante señalar que debido a la gran variedad de este tipo de materiales se pueden obtener colores y texturas diversas.

Entre los materiales más comunes de esta categoría, se encuentran: papel fabriano, papeles texturizados, papel y cartulina opalina, cartulina primavera, cartulina sulfatada, cartulina kromakote, cartulina couche, cartón ilustración, cartón batería, cartón comprimido o gris, cartón corrugado y micro corrugado, mampara foam board y corcho (fig. 1.14). La figura 1.15 muestra un modelo físico a escala elaborado con cartón batería, al igual que la figura 1.16, pero este último empleando además diversos papeles.

Knoll (2001) incluye dentro de esta clasificación al corcho, por ser un material que también se compone de fibras o residuos vegetales.

Los cartones son materiales particularmente ligeros pero resistentes, algunos de ellos contienen un núcleo rígido de espuma.

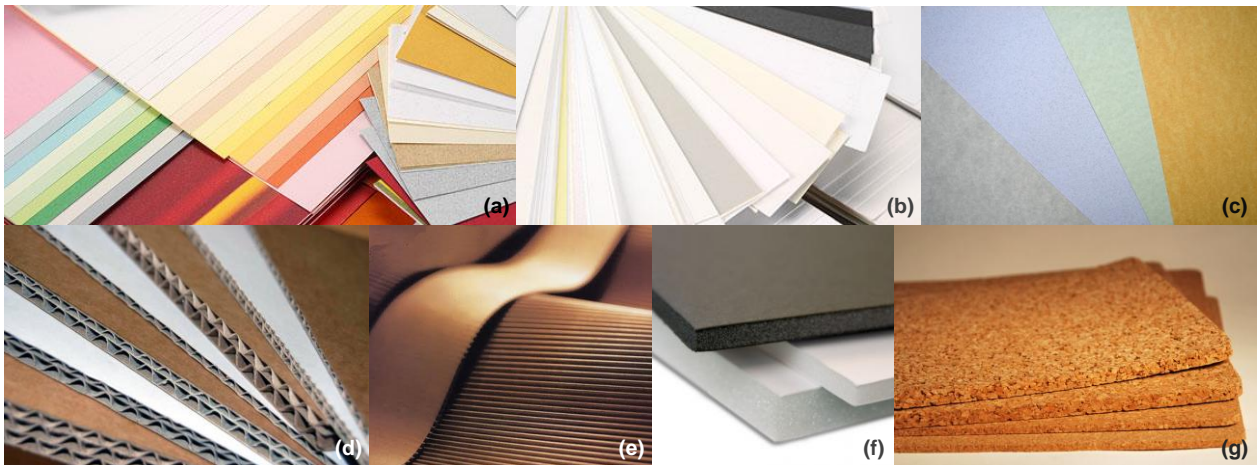


Fig. 1.14. Variedad de: (a) y (b) papeles, (c) cartulinas texturizadas, (d) cartones corrugados, (e) cartones micro corrugados, (f) mamparas *foam board* y (g) corchos. (a) y (b) (<http://www.difoto.es/>), (c) (<http://manualidades.innatia.com/>), (d) (<http://www.valenbeck.co.uk/>), (e) (<http://wanlinksniper.blogspot.mx/>), (f) (<http://www.artstoreonline.com.au/>) y (g) (<http://www.multifeutre.com/>)

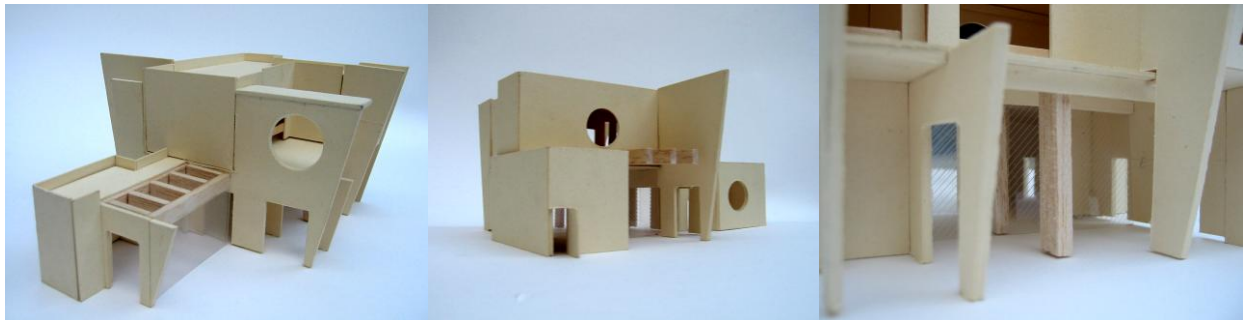


Fig. 1.15. Modelo físico a escala realizado con cartón batería.



Fig. 1.16. Modelo físico a escala realizado con cartón batería y papeles.

1.1.2.2. Maderas

Después de los papeles y las cartulinas, las maderas son de los materiales más comunes para la construcción de modelos físicos a escala. Éstas pueden emplearse para la fabricación de la base de la maqueta, para dar textura y estructura al modelo.

Existe una amplia variedad de maderas, algunas de ellas pueden cortarse fácilmente con un cúter, un ejemplo de ello son la madera balsa y la chapa de madera.

Por otra parte, pueden encontrarse maderas con distintos colores y diseño de vetas. Las maderas más comunes son: mdf con y sin acabado, triplay, madera balsa y chapa de madera (fig. 1.17). La figura 1.18 muestra el ejemplo de un modelo físico a escala fabricado con madera.



Fig. 1.17. Diversidad de maderas: (a) MDF, (b) triplay, (c) madera balsa, (d) y (e) chapa de madera. (a) (<http://www.consmos.com/>), (b) (<http://www.bozovich.com/>), (c) (<http://www.c2f.com/>), (d) (<http://www.hardwoodflooringbuyersguide.com/>) y (e) (<http://www.materialicious.com/>)

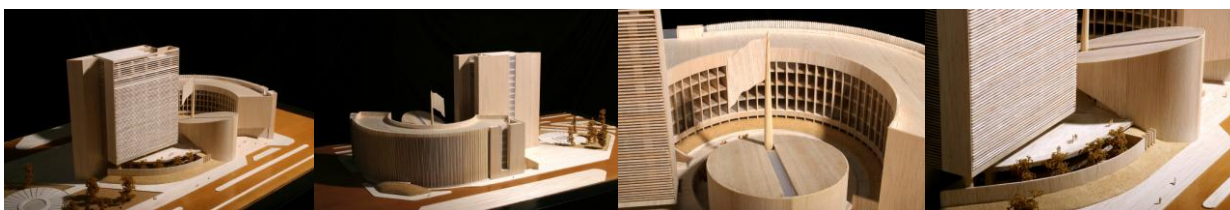


Fig. 1.18. Modelo físico a escala del nuevo Senado de la República Mexicana, elaborado en madera balsa. (<http://hago.com.mx/>)

1.1.2.3. Plásticos o polímeros

Dentro de esta clasificación se incluyen a todos aquellos materiales sintéticos, obtenidos mediante un proceso de polimerización⁵ de átomos de carbono, a partir de compuestos orgánicos derivados del petróleo u otras sustancias naturales.

La mayoría de estos materiales poseen la característica de ser flexibles y pueden encontrarse con diversas variantes: traslúcidos o transparentes, opacos, brillosos, de diversos colores, con texturas, entre otros.

El uso de este tipo de materiales es diverso para la realización de un modelo físico a escala. Pueden emplearse para realizar todo el modelo o partes del mismo. Específicamente los plásticos traslúcidos se utilizan comúnmente para simular ventanas, fachadas acristaladas o cualquier otro elemento que requiera cierta transparencia.

Los materiales más comunes en esta categoría son: acrílico, polipropileno, lámina de acetato, mica de PVC, estireno y espuma de poliestireno expandido (unicel), trovicel de PVC espumoso, entre otros (fig. 1.19). La figura 1.20 muestra un modelo físico a escala empleado algunos de los materiales antes mencionados.

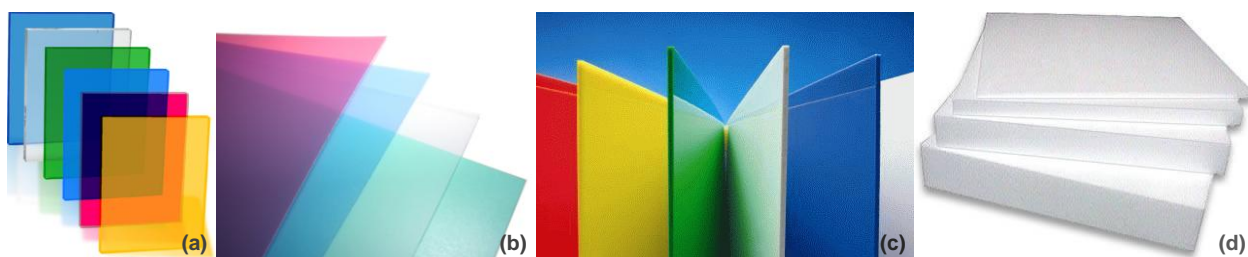


Fig. 1.19. Variedad de plásticos: (a) acrílico, (b) polipropileno, (c) estireno y (d) espuma de poliestireno expandido. (a) (<http://francisca-martinez.blogspot.mx/>), (b) (<http://www.artstore.co.uk/>), (c) (<http://marzua.blogspot.mx/>) y (d) (<http://www.rolysig.com/>)

⁵ Es un proceso químico, donde los monómeros se agrupan químicamente, dando lugar a una gran molécula llamada polímero.

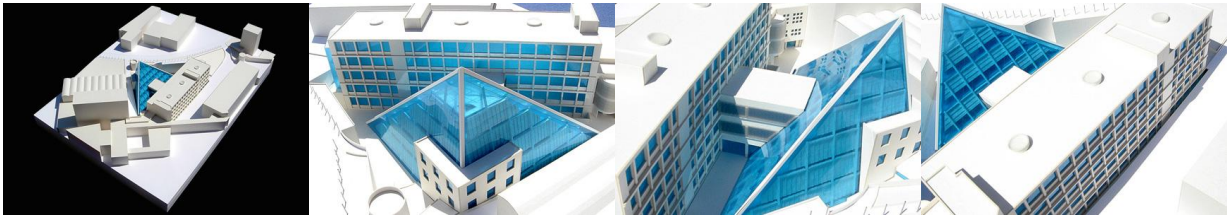


Fig. 1.20. Modelo físico a escala de la Facultad de Arquitectura de Tesalónica en Grecia. El modelo está elaborado con materiales como estireno y otros plásticos, además de diversos papeles.

(<http://www.architecturalmodel.gr/>)

1.1.2.4. Espumas

Las espumas en esta clasificación son de poliuretano expandido, por lo que al igual que los plásticos también son un polímero. Éstas se emplean comúnmente en modelos físicos a escala a nivel anteproyecto, o sea, con carácter conceptual.

Algunas espumas son suaves y otras rígidas, sin embargo, las más utilizadas son las rígidas debido a que son más fáciles de cortar y moldear. La figura 1.21 ilustra algunas espumas de poliuretano (suaves y rígidas), mientras que la figura 1.22 muestra un modelo físico a escala empleando dichos materiales.

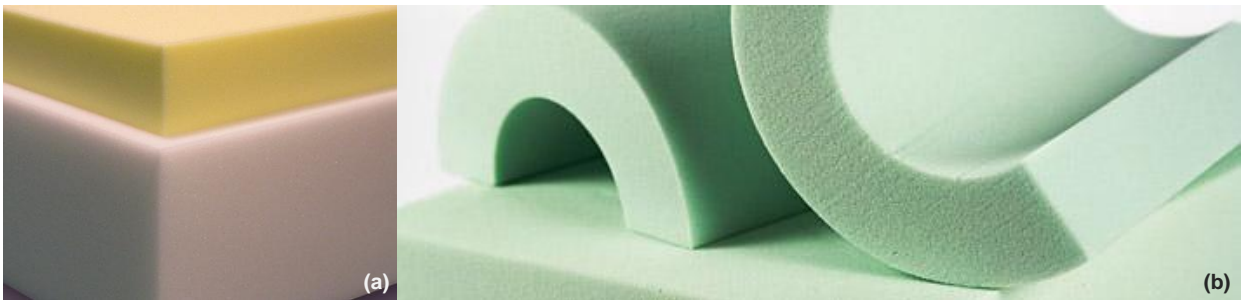


Fig. 1.21. Espumas de poliuretano expandido: (a) suaves y (b) rígidas. (a) (<http://www.jomaro.com.ar/>) y (b) (<http://www.poliuretanos.com/>)

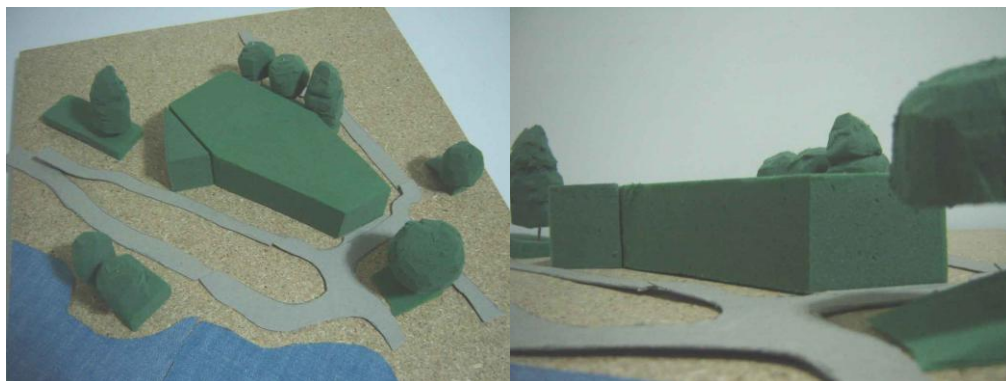


Fig. 1.22. Modelo físico a escala a nivel conceptual, elaborado con espuma rígida de poliuretano expandido. (<http://homepages.mty.itesm.mx/al794057/boceto.html>)

1.1.2.5. Metales

Dentro de la elaboración de modelos físicos a escala, los metales se emplean en menor medida. Pueden utilizarse para reproducir alguna estructura metálica, para recubrir fachadas o en algún modelo de un corte por fachada.

Algunos de los materiales más comunes de esta clasificación son: alambres, chapas de metal, láminas de aluminio, perfiles y mallas metálicas (fig. 1.23). Las figuras 1.24 a 1.26 ejemplifican algunos modelos físicos a escala empleando algunos de los materiales antes mencionados.

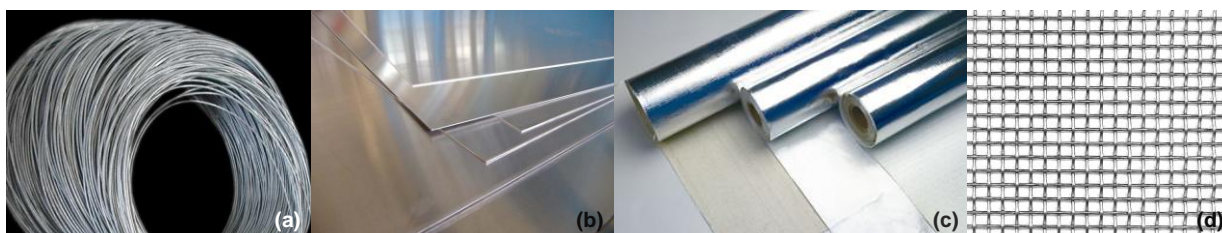


Fig. 1.23. Materiales metálicos: (a) alambre, (b) y (c) láminas de aluminio, (d) malla metálica. (a) (<http://www.grupocobos.com.mx/>), (b) (<http://manualidadesnavidenas.net/>) (c) (<http://www.bondtape.es/>) y (d) (<http://www.archiexpo.es/>)

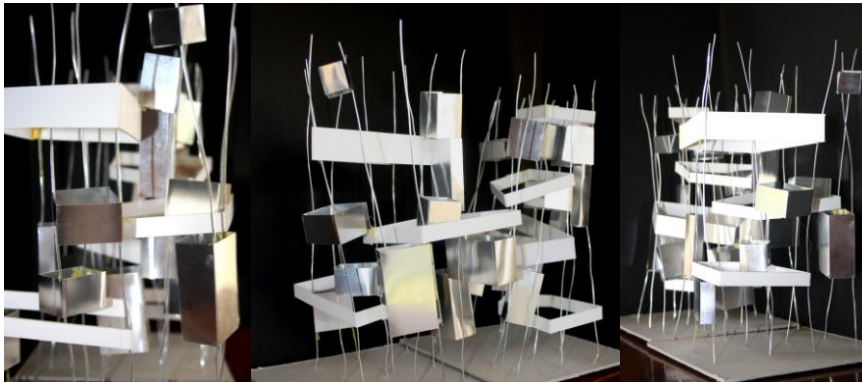


Fig. 1.24. Modelo físico a escala a nivel conceptual. Elaborado con alambres y láminas de aluminio.
(<http://marialladro3y4.blogspot.mx/>)



Fig. 1.25. Modelo físico a escala de una estructura metálica. Modelo elaborado con alambres.
(<http://www.oneoff.it/>)

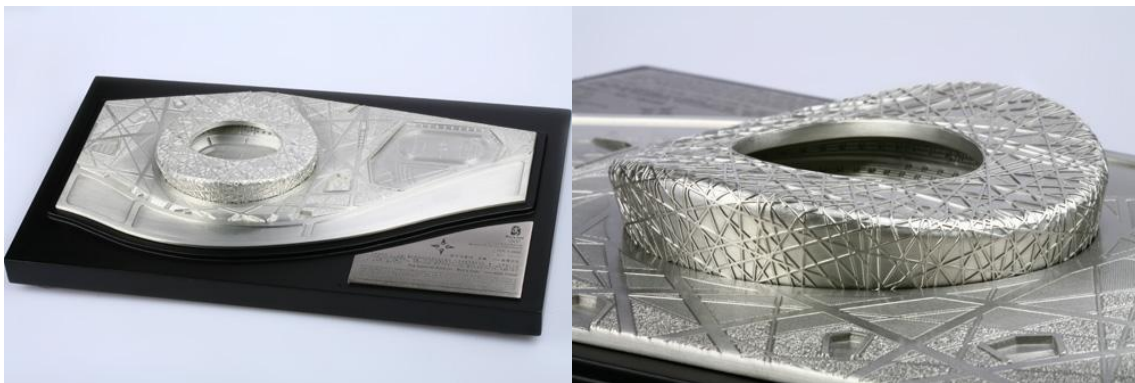


Fig. 1.26. Modelo físico a escala del Estadio Nacional de Beijing en China. Modelo elaborado con diversos metales y recubierto de estaño. (<http://en.beijing2008.cn/>)

1.1.2.6. Otros (textiles, pinturas, arena, entre otros)

Además de los materiales señalados anteriormente, pueden mencionarse otros, los cuales se emplean en situaciones específicas. Dichos materiales ayudan a ambientar los modelos o darles un acabado diferente al original.

En esta clasificación, se encuentran: materiales modelables como el yeso, pinturas, textiles, pasto artificial, arena artificial o natural, vegetación muerta o artificial y objetos diversos (fig. 1.27). En la figura 1.28 se muestran algunos modelos físicos a escala empleando dichos materiales.



Fig. 1.27. Materiales diversos: (a) pinturas acrílicas para maquetas, (b) lycras, (c) y (d) pasto artificial para maquetas y (e) arena natural. (a) (<http://moeidolatry.com/>), (b) (<http://www.emestext.com/>), (c) (<http://blog.craftzine.com/>), (d) (<http://www.architectural-scalemodel.com/>) y (e) (<http://www.google.es/>)

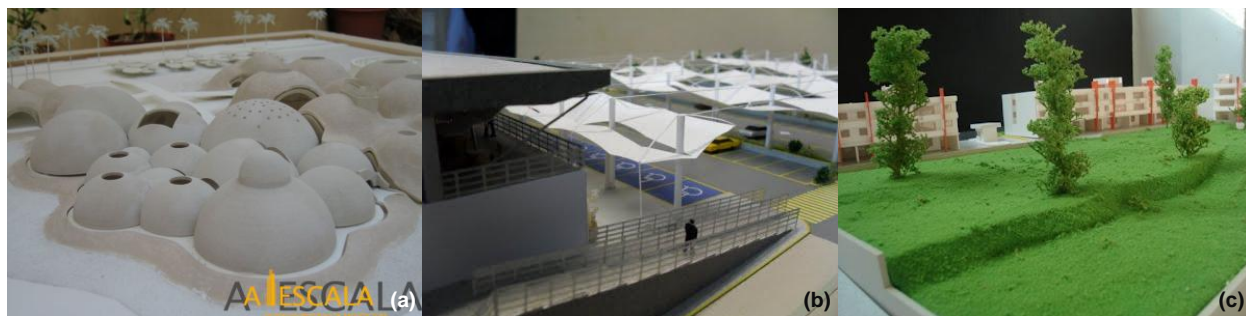


Fig. 1.28. Modelos físicos a escala empleando: (a) material modelable (propuesta para el Museo de las Ciencias en Almería, España), (b) lycra para representar velarías (propuesta de un complejo de oficinas) y (c) pasto y árboles para maquetas (representación del parque San Diego en Cholula, Puebla, México). (a) (<http://www.aescalamaquetas.com/>), (b) (<http://maquetas-profesionales.blogspot.mx/>) y (c) (<http://architecturalmodels.blogspot.mx/>)

En la siguiente sección se continúa con un breve recorrido histórico, el cual constituye el estado del conocimiento previo a esta investigación.

1.2. Una visión retrospectiva de la simulación del sonido en la arquitectura

Para el desarrollo de una parte de este capítulo, fue necesario referirse al trabajo de Bill Addis, publicado en 2009, y titulado “*A Brief History of Design Methods for Building Acoustics*” (Una breve historia en relación a los métodos de diseño empleados en la acústica arquitectónica).

1.2.1. Edad Antigua, Edad Media y Época Moderna

El fenómeno del sonido dentro de los espacios, ha sido un elemento importante para los arquitectos desde hace 2 500 años, según Addis (2009), especialmente cuando se trata de espacios como teatros, salas de concierto, entre otros.

Este autor considera a Vitruvio⁶ como el primero en contemplar algunos elementos para el diseño de teatros, ya que éste dedicó gran parte de los capítulos de su tratado al diseño edilicio, entre ellos a los teatros. En el tema de la acústica, repite lo que encontró en algunos tratados griegos de siglos anteriores, los cuales podrían tener sus orígenes a partir de Pitágoras⁷. Entre los aspectos más significativos, señaló que existe una necesidad de que el sonido viaje de manera directa desde el escenario hacia los oídos de cada individuo de toda la audiencia, tal y como viajan las ondas en el agua al lanzar una piedra. También mencionó que las ondas reflejadas pueden interferir con las ondas directas, lo que produciría una distorsión de la señal para el oyente (hecho que difiere con lo estudiado en la actualidad), afectando a la inteligibilidad de la palabra⁸, por lo que recomienda no utilizar elementos reflectores que puedan alcanzar las ondas y por lo tanto provocar alguna distorsión. Por último, señaló que el sitio del teatro deber ser cuidadosamente elegido, por lo que no deberá tener ecos ni elementos que ocasionen reflexiones del sonido, lo que originaría interferencia en la señal.

⁶ Marco Vitruvio Polión, fue un arquitecto, escritor, ingeniero y tratadista romano del siglo I a.C. Es el autor del tratado sobre arquitectura más antiguo que se conserva. (<http://www.biografiasyvidas.com/>)

⁷ Fue un filósofo y matemático griego, considerado el primer matemático puro. Influyó en Platón y Aristóteles. Aportó grandes conocimientos en la rama de las matemáticas, la geometría y la aritmética. Uno de los mayores éxitos de Pitágoras fue el estudio del sonido, pues fue el primero en darse cuenta que la música podía medirse. Entre sus descubrimientos; observó que las cuerdas de instrumentos musicales producían sonidos de tonos más agudos cuando se acortaban. (<http://www.portalplanetasedna.com.ar/>)

⁸ La inteligibilidad de la palabra es la capacidad que tiene un oyente para comprender un mensaje hablado.

Durante la edad media y el renacimiento, Addis (2009) indica que no hay escritos significativos sobre la acústica en los espacios. Sin embargo, señala que a partir del desarrollo de la música en el siglo XII, se pudo haber tenido algún entendimiento de la acústica en los espacios, los cuales tenían la cualidad de tiempos de reverberación muy altos que dificultaban la inteligibilidad de la palabra, pero favorecían la ejecución de algunos instrumentos, tales como el órgano, la flauta, el violín, además de la voz humana, pero cantada.

Prosiguiendo con la historia, este autor señala que la acústica como ciencia, comenzó a desarrollarse entre los siglos XVIII y XIX, con principal interés en los instrumentos musicales. Añade que la inteligibilidad de la palabra vuelve a prestar atención como en el mundo antiguo con Vitruvio, pero particularmente en espacios como teatros y salas de debate utilizadas por políticos.

Menciona que durante el siglo XVIII, la importancia de la acústica en las salas, adquiere relevancia con la música de cámara al incorporar algunos instrumentos como el clavecín y el fortepiano. En relación a esto, es importante mencionar que durante este periodo se diseñaron nuevos instrumentos, los cuales fueron ejecutados en salas muy vivas, por lo que las notas individuales no se distinguían, lo que llevo a intuir que el tamaño del espacio y las propiedades reflectantes de las superficies afectaban la inteligibilidad de la palabra y la música, aspectos que comenzaron a estudiarse.

Señala que este nuevo conocimiento, llevó a la utilización de algunas reglas que ayudarían a obtener una acústica aceptable en las salas. Debido a ello, sólo podían utilizarse algunas superficies como piedras y yeso para intensificar las reflexiones; tejidos como tapices y cortinas que pudieran absorber el sonido; y paneles de madera como elemento intermedio entre los dos anteriores. Con estas reglas, el diseñador podría combinar dichos materiales para el diseño de la sala.

Otro factor importante a considerar, fue la distancia del escenario en relación a la audiencia, para asegurarse que ésta pudiera escuchar a los actores, cantantes e instrumentos desde cualquier punto, además de recibir sonido directo, por lo que se consideró una distancia entre el orador y el oyente de 18 m para un buen entendimiento, y 25 m con cierta dificultad.

Las reglas antes mencionadas no siempre funcionaron, además que en ocasiones no se cumplían, ya que al aumentar el número de audiencia tenían que construirse salas muy grandes con distancias de hasta 30 metros entre escenario y espectador. Esto provocó desastres acústicos causando que actores, cantantes y músicos comenzaran a quejarse.

Por otra parte, durante este periodo se pretendieron realizar espacios en común para el habla y la música, lo que nunca resultó, pues ambos consideraban condiciones espaciales diferentes, por lo que tuvieron que construirse espacios independientes para cada uso.

Addis (2009) comenta que durante la segunda mitad de siglo XVIII, comenzaron a realizarse estudios del trayecto del sonido en los espacios a través de esquemas simples, como los que se muestran en la figura 1.29. Entre los primeros acústicos en realizar dichos esquemas, se encuentran: Patte⁹ en 1782, Saunders¹⁰ en 1790, Rhode¹¹ en 1800 y Langhans¹² en 1810. Así mismo, los diseños de las salas comenzaron a tener cambios, por ejemplo, el techo ubicado encima del escenario funcionaba como un gran reflector hacia la audiencia, por lo que tenía que inclinarse hacia ella.

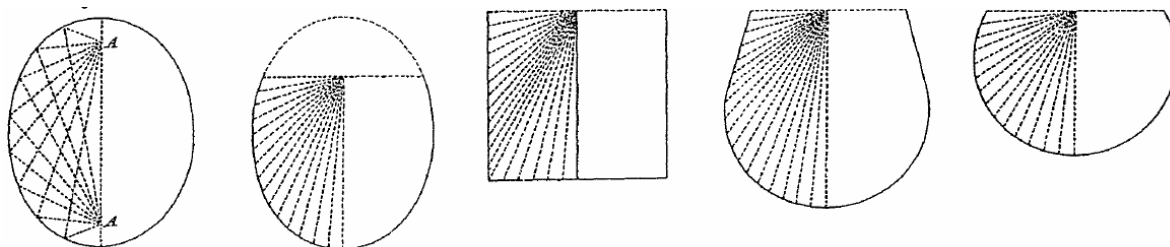


Fig. 1.29. Diagramas de rayos sonoros de diferentes tipos de plantas, desarrollados por Saunders en su tratado sobre teatros “*Treatise on Theaters*” en 1790. (Thompson, 2002)

⁹ Pierre Patte, fue un arquitecto y teórico francés. Escribió varios tratados sobre arquitectura y urbanismo. En relación a la acústica arquitectónica, escribió un tratado sobre arquitectura teatral, basándose en los principios de la óptica y la acústica “*Essai sur l'architecture théâtrale. Ou de l'ordonnance la plus avantageuse á une sale de spectacles, relativement aux principes de l'optique et de l'acoustique*”. (<http://www.biografiasyvidas.com/>)

¹⁰ George Saunders fue un arquitecto británico. Analizó la propagación del sonido en relación a la voz humana, por lo que realizó diversos estudios de la expansión de la voz, así como del rango máximo de audición entre un oyente y un orador. También observó que la forma y dimensiones del espacio eran elementos determinantes para una buena acústica del recinto. En relación a lo anterior, Saunders realizó el diseño de teatros a partir de los estudios realizados. (Thompson, 2002)

¹¹ Johann Gottlieb Rhode fue un escritor versátil alemán. Fue director de varios teatros. Escribió tratados con diversidad de temas, pero en relación a la acústica arquitectónica, escribió acerca de la teoría de la distribución del sonido para arquitectos “*Theorie der Verbreitung des Schalles für Baukünstler*” en 1800. (<http://de.wikisource.org/>)

¹² Carl F. Gotthard Langhans fue un arquitecto alemán. Su trabajo más destacado fue la Puerta de Brandeburgo en Berlín. Escribió también sobre la acústica de teatros “*Ueber theater, oder, Bemerkungen über Katakustik in beziehung auf Theater*”. (<http://www.biografiasyvidas.com/>)

Explica que a partir del estudio de rayos sonoros y después de varios estudios realizados por Saunders, se concluyó que la forma oval y la de herradura eran las más indicadas, sin embargo, no permitían una buena visibilidad, por lo que se eligió la de forma semicircular como la mejor opción.

1.2.2. Época Contemporánea

Addis (2009) menciona que durante el siglo XIX se construyeron nuevas salas de concierto para satisfacer la popularidad de los conciertos con orquestas sinfónicas. Estos espacios ya diferían de los usados tradicionalmente, como iglesias, salones de palacios, teatros y casas de ópera.

A finales del siglo XIX, Wallace Sabine (de quien se hablará con mayor detalle en el Capítulo 3) descubrió el fenómeno de la reverberación dentro de un espacio, así como los efectos de la absorción en el mismo, es por estos descubrimientos que es considerado un parte aguas en el campo de la acústica arquitectónica y por ende declarado el padre de la misma.

Este autor señala que Sabine centra su atención en el diseño de nuevas salas con el fin de crear una experiencia acústica casi uniforme para toda la audiencia. Para ello, comienza a realizar estudios de las ondas sonoras reflejadas dentro de un espacio a partir del método de Schlieren¹³, empleando un modelo físico a escala (fig. 1.30) ubicándolo en planta y alzado. Este modelo físico a escala puede considerarse como el primero en ser utilizado para investigar el comportamiento del sonido dentro de un espacio.

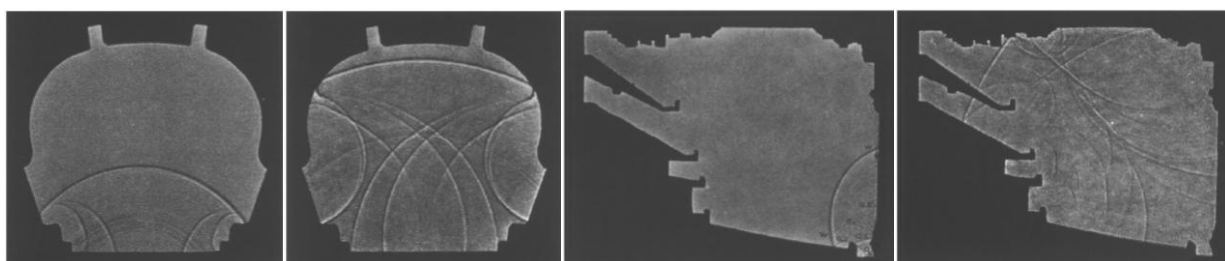


Fig. 1.30. Fotografías del modelo físico a escala construido por Sabine, para estudiar el comportamiento del sonido dentro del mismo, a partir del método de Schlieren. Fotografías tomadas por Sabine en 1925.
(Addis, 2009)

¹³ Método óptico de visualización que capta las variaciones en el aire.

Después del descubrimiento de Sabine, la medición del tiempo de reverberación en los espacios podía calcularse a partir de la fórmula de Sabine, sin embargo, para muchos continuaba siendo un proceso empírico.

Addis (2009) menciona que comenzaron a explorarse nuevas formas en las salas y muchas reglas que continuaban usándose desde el siglo XIX se adaptaban menos. Por consiguiente, fue necesario continuar con la investigación que Patte y otros ya habían comenzado años atrás en relación a la trayectoria del sonido en los espacios. Gustave Lyon¹⁴ y Víctor Horta¹⁵, fueron de los pioneros en realizar dichos estudios, los cuales consistían en elaborar esquemas de los rayos del sonido directo y reflexiones del mismo a partir de muros y techo. La figura 1.31, muestra un estudio de las reflexiones del sonido realizadas por Víctor Horta.

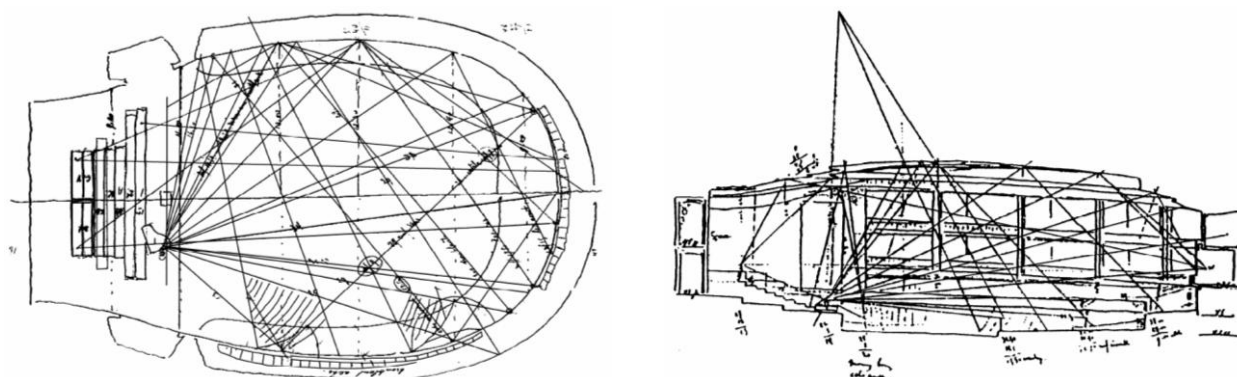


Fig. 1.31. Estudio de los rayos sonoros de la Sala Henri-le-Boeuf, en Bruselas. Diagramas realizados por Víctor Horta en 1928 (documentos provenientes del archivo del Museo de Horta). (Addis, 2009)

Además, durante ese siglo, en los años de 1930, los alemanes comenzaron a trabajar con rayos de luz en modelos físicos a escala, intentando explicar aún más la propagación del sonido dentro de un espacio. Sin embargo, dicho método no aportó demasiada información en relación a la propagación del sonido en diferentes frecuencias, al tiempo de reverberación y al tiempo que tarda el sonido en llegar a los oyentes (temas que en ese momento intentaban esclarecerse aun más).

¹⁴ Nace en París en una familia de músicos. Se interesó por el estudio de los instrumentos musicales. Creó diversos instrumentos, entre los cuales están: el piano, el arpa, el clavicordio, entre otros. Es considerado uno de los pioneros de la acústica arquitectónica, ya que fue requerido para mejorar la acústica de varias salas de París y Francia. (<http://annales.org/>)

¹⁵ Arquitecto belga. Es conocido por el diseño de mansiones con estilo *Art Nouveau* puro. Realizó los planos para la construcción del Centro de Bellas Artes en Bruselas. (<https://lirias.kuleuven.be/>)

Posteriormente, Addis (2009) señala que durante los años cincuenta, la acústica avanzó de manera asombrosa desde el punto de vista de la física y la ingeniería, después de la Segunda Guerra Mundial. Durante esa etapa, se observó que el sonido viajaba mucho más rápido en el agua que en el aire (de 1 435 m/s a 1 500 m/s, dependiendo la presión, temperatura y salinidad), por lo que se utilizaban micrófonos submarinos para detectar motores de barcos y submarinos. Así mismo, también se desarrollaron radares para detectar la aproximación de algún avión enemigo.

Explica que después de la Segunda Guerra Mundial, varios de los acústicos que participaron en ella, se convirtieron en consultores acústicos de salas de concierto. No obstante, a pesar del nuevo conocimiento, la acústica aún estaba muy lejos de ser una ciencia exacta y su evaluación era subjetiva. Esto se dice debido a que el Royal Festival Hall fue la sala más estudiada en esa época y en la historia. Comenzaron a realizarse intervenciones en ella, dando pie a discusiones entre qué tiempo de reverberación debía ser el más conveniente. Algunos argumentaban que 2.2 segundos era lo adecuado, mientras otros decían 1.7 segundos. Al final la sala quedó de 1.5 segundos, lo que a muchos les pareció poco y a otros bien. Finalmente tuvieron que incorporarle un sistema de audio con micrófonos y bocinas para proporcionar un efecto de “resonancia asistida¹⁶”, el cual hacía incrementar el tiempo de reverberación deseado a 1.7 segundos. Después de esto, en 1995 se llegó al acuerdo de evitar la acústica asistida (sistemas de audio) en la sala y dejar la acústica original de la misma.

Indica que no fue sino hasta el siglo XX que algunos métodos diseñados a partir de la Segunda Guerra Mundial, comenzaron a utilizarse para el estudio de la acústica en los espacios. Durante este tiempo, la medición de las ondas sonoras comenzó a realizarse a partir del desarrollo de micrófonos, amplificadores, osciloscopios y máquinas de grabación. En 1930 comenzaron a emplearse los modelos físicos a escala como una herramienta para conocer la respuesta acústica de los espacios, así como para predecir el comportamiento acústico de los mismos, principalmente para salas de concierto, y auditorios, entre otros. En relación a esto, enfatiza que los modelos físicos a escala ya se usaban por arquitectos miles de años atrás, pero con otro fin.

¹⁶ Sistema inventado con el fin de resolver problemas de bajo tiempo de reverberación a frecuencias bajas. Dicho sistema emplea un elevado número de canales (micrófono, amplificador y bocina). (<http://es.scribd.com/>)

Menciona que el primero en realizar modelos físicos a escala y experimentar con ellos, fue el físico alemán Friedrich Spandök, quien demostró que el comportamiento acústico de un espacio, varía dependiendo la escala del modelo de manera inversa, por lo que señala que las frecuencias del sonido debían ser mayores. Por ejemplo: para un modelo físico a escala 1:50, la frecuencia de sonido debía ser 5 veces mayor que la normal. También señaló la necesidad de controlar la temperatura, presión y densidad del aire, pues estos factores afectaban la velocidad de las frecuencias de estudio. Cabe mencionar que Spandök se apoyó del uso de micrófonos, los cuales desplegaban el decaimiento del sonido del modelo físico a escala en la pantalla de un osciloscopio. Los resultados se conservaron a partir de fotografías tomadas de la pantalla del osciloscopio, como se muestra en la figura 1.32.

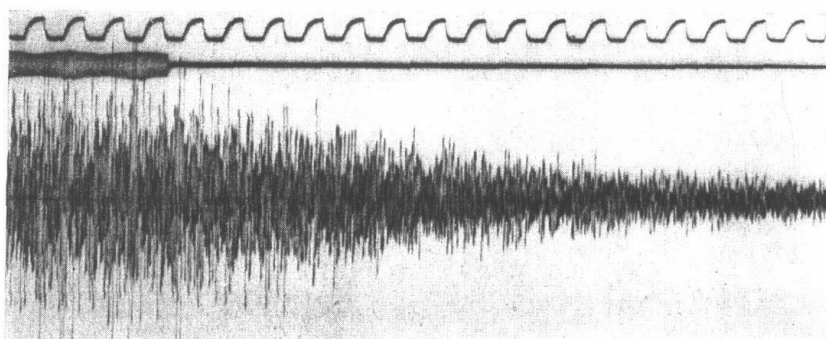


Fig. 1.32. Fotografía tomada de la pantalla de un osciloscopio, que muestra el decaimiento sonoro de un modelo físico a escala realizado por Spandök (1934). (Addis, 2006)

Por otra parte, Addis (2009) señala que otro personaje importante que trabajó con modelos físicos a escala, fue el acústico danés Vilhelm Jordan, quien fue el primero en utilizar una grabadora para reportar los resultados y después analizarlos. En 1960 fue seleccionado para realizar el diseño acústico de la Ópera de Sídney, la cual se proponía para diferentes usos, tales como conciertos, ópera y habla. Debido a los múltiples usos, el requerimiento del tiempo de reverberación era distinto para cada uno de ellos, por lo que Jordan empleó diferentes modelos físicos a escala 1:10. Utilizó madera, neopreno (para simular la audiencia), cartón, entre otros. Sin embargo, Jordan llegó a la conclusión que era casi imposible diseñar un espacio para tantos usos, pues entre uno de los elementos que complicaban el comportamiento acústico deseado, era la forma curva de los muros.

Los modelos realizados por Jordan, le permitieron experimentar con diferentes elementos y observar distintos fenómenos dentro de los mismos. Por ejemplo, observó que al introducir muros laterales, estos producían reflexiones laterales. Además, se percató que con la propuesta original del techo, las primeras reflexiones no llegaban a la orquesta, por lo que propuso reflectores suspendidos por encima del escenario, sin embargo no funcionaron. Después, experimentó al disminuir la distancia entre los muros laterales y notó que el efecto disminuía bastante. Por último, incorporó reflectores suspendidos por encima de la orquesta, los cuales pudieran ajustarse.

Las figuras 1.33 a 1.38 muestran los modelos físicos a escala realizados por Jordan del interior de la Ópera de Sídney, con objeto de estudiar el comportamiento acústico del recinto. Las figuras 1.33 y 1.34, corresponden al primer modelo, las figuras 1.35 y 1.36, corresponden al segundo modelo y la figura 1.37, al último. En la figura 1.37, puede observarse a V. Jordan. Finalmente, la figura 1.38, muestra el momento de una medición en uno de los modelos físicos a escala.



Fig. 1.33 y 1.34. Primer modelo físico a escala de la Ópera de Sídney realizado por Jordan. (Addis, 2006 y 2009)

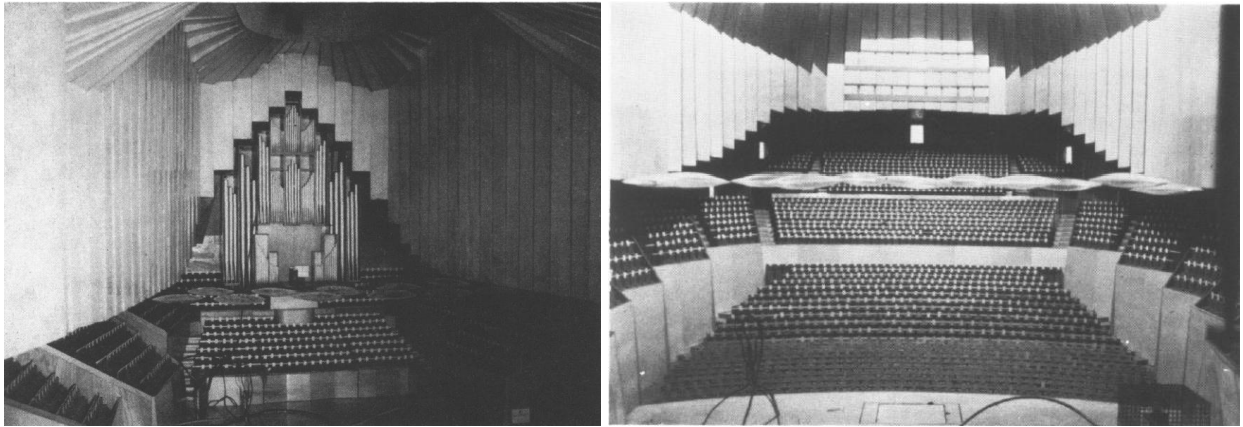


Fig.1.35 y 1.36. Segundo modelo físico a escala de la Ópera de Sídney realizado por Jordan. (Addis, 2006 y 2009)



Fig. 1.37. Último modelo físico a escala de la Ópera de Sídney realizado por Jordan. (Addis, 2009)



Fig. 1.38. Medición en uno de los modelos físicos a escala de la Ópera de Sídney realizados por Jordan.
(<http://www.jordanakustik.dk/>)

Addis menciona que la acústica final del auditorio de la Ópera de Sídney se evaluó y probó en el espacio real con orquesta y audiencia real. En algunas ocasiones lanzaban un disparo y en otras pedían a la orquesta parar en alguna parte del tema ejecutado. Los resultados se grabaron y se emplearon para calibrar el modelo físico a escala, principalmente en los reflectores, pues eran los únicos elementos movibles dentro del espacio.

Por último, Addis (2009) señala que el trabajo realizado por Jordan para la Ópera de Sídney fue un hito en el desarrollo de la acústica; primero por experimentar en modelos físicos a escala y en segundo por definir y encontrar otros parámetros de calidad acústica a parte del tiempo de reverberación para determinar la calidad acústica de un recinto. Por lo anterior, es importante señalar que durante ese siglo (XX), gracias a los avances tecnológicos y electrónicos, pudo medirse el comportamiento en los recintos, y por lo tanto comenzaron a definirse otros parámetros de calidad acústica, mismos que se describirán a mayor detalle en el Capítulo 3 de esta investigación.

Ahora bien, a partir de la compilación de textos y artículos para esta investigación, el primer documento encontrado en mencionar la absorción sonora en modelos físicos a escala, corresponde al año de 1970, publicado por la BBC¹⁷ (*Research Department Engineering Division*) y titulado “*Acoustic Scaling – General Outline*” (Escalamiento en Acústica – Esquema General) de Harwood y Burd.

¹⁷ La *British Broadcasting Corporation* (BBC), es el principal servicio de comunicación del Reino Unido. Se le ha considerado como el mayor grupo de comunicación del mundo. La función de la BBC es la retransmisión por televisión y radio en forma pública. (<http://es.wikipedia.org/>)

En dicho documento se señala que dentro de los siguientes diez años, serían construidos y remodelados varios estudios de música para la BBC, motivo por el cual tendrían que trabajarse nuevos diseños con materiales del momento, por lo que no sería recomendable copiar diseños de salas existentes de años anteriores, pues los materiales y métodos modernos de construcción afectarían las propiedades acústicas de los estudios.

Debido a lo anterior, mencionan que sería muy útil y conveniente que los arquitectos fueran capaces de determinar los fenómenos y el comportamiento acústico de los espacios con cambios de material y formas en él. Esto evitaría errores de diseño dentro de los espacios que después resultarían difíciles y costosos de corregir una vez construidos.

Indican que una técnica muy conveniente que permite la determinación de los fenómenos y el comportamiento acústico de un espacio, es la utilización de modelos físicos a escala. Señalan que esta técnica fue empleada por Spandök y Jordan años atrás, cuyos métodos serían retomados para dicho documento.

Por otra parte, definen algunos principios básicos de acuerdo a lo establecido por Spandök y Jordan. Señalan que en un medio como el aire, la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, por lo que si un modelo físico a escala es construido con un factor de escala de $1/k$, las siguientes condiciones en relación al espacio real, deben ser consideradas:

- El tiempo entre reflexiones se reducirá en una relación de $1/k$, a pesar que el medio de transmisión, o sea el aire, así como la velocidad del sonido se mantienen sin cambio alguno.
- Para una similitud en el comportamiento de las ondas sonoras, la longitud de onda debe ser reducida en una proporción de $1/k$, por lo tanto, las frecuencias deben aumentarse en una relación de $k/1$.
- La absorción del aire debe tener un valor de k veces a la aplicada en frecuencias normales, ya que la distancia entre longitudes se reduce por esta relación.
- Si la impedancia acústica de las superficies del modelo al aumentar la frecuencia es igual a las de las superficies del espacio real en frecuencias normales, se deduce que

para un promedio constante del coeficiente de absorción, el tiempo de reverberación se reducirá en una relación de $1/k$.

De acuerdo a los puntos antes mencionados, indican que si se desea la construcción de un modelo físico a una escala deseada, la absorción de las superficies y del ambiente, deben corresponder a las del espacio real. Además, profundizan en las características del modelo, la fuente sonora, los micrófonos y el sistema de grabación, para la realización de mediciones en el modelo.

La figura 1.39, muestra la medición en el primer modelo físico a escala realizado por la BBC, de uno de los estudios de la *Maida Vale Studios*¹⁸. En la figura también se muestran la fuente sonora y el micrófono empleados para dicha medición. El modelo se construyó con una relación de escala 1:8.

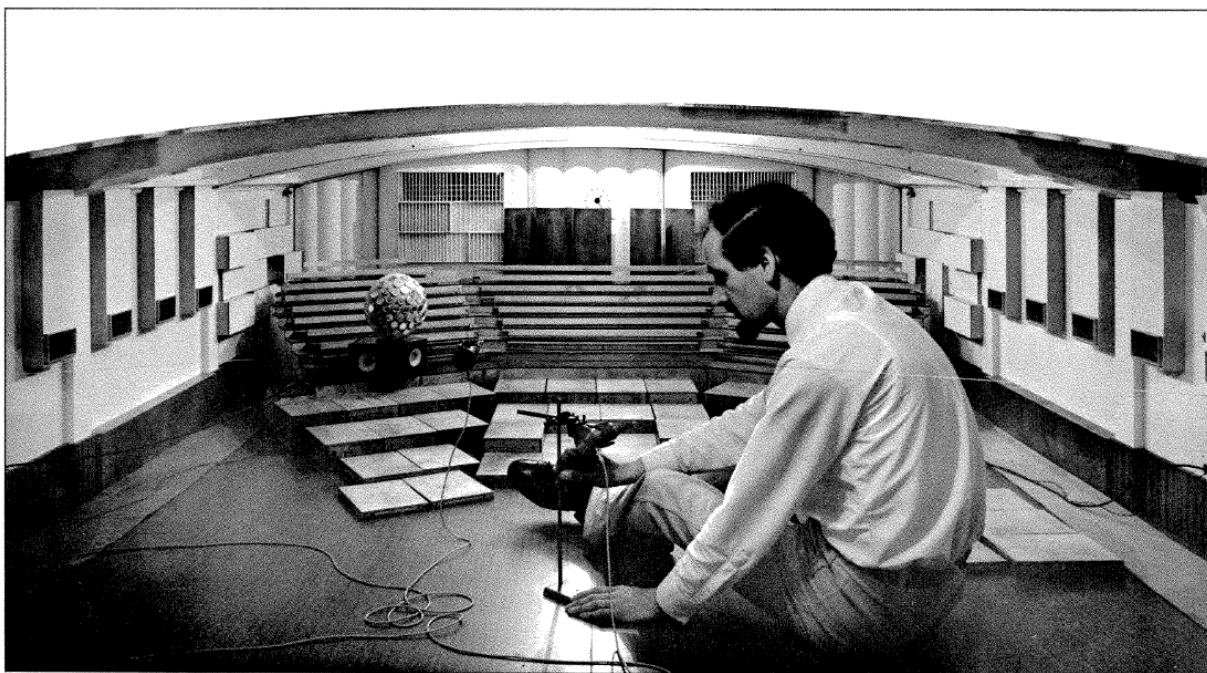


Fig. 1.39. Primer modelo físico a escala de uno de los estudios de la *Maida Vale Studios* de la BBC.
(Harwood y Burd, BBC, 1970)

¹⁸ *Maida Vale Studios*, es un complejo de estudios de la BBC en Londres. Dichos estudios se han utilizado para grabar música clásica, popular y sesiones de teatro para la BBC Radio desde 1946. (<http://es.wikipedia.org/>)

Posterior a este estudio, la BBC construyó una cámara reverberante en miniatura, escala 1:8, con objeto de determinar el coeficiente de absorción sonora de materiales que simularan los del espacio real. El estudio y desarrollo de la cámara reverberante se publicaron en otro documento titulado “*Acoustic Scaling – A one-eighth scale model reverberation room*” (Escalamiento en Acústica – Modelo a escala 1:8 de una cámara reverberante), en el año de 1971 por Spring, Randall y Smith.

En dicho documento, proponen las medidas que debe tener una cámara reverberante a escala 1:8, así como las características físicas de la misma y los componentes necesarios para su uso. La figura 1.40, muestra la cámara reverberante construida por la BBC.

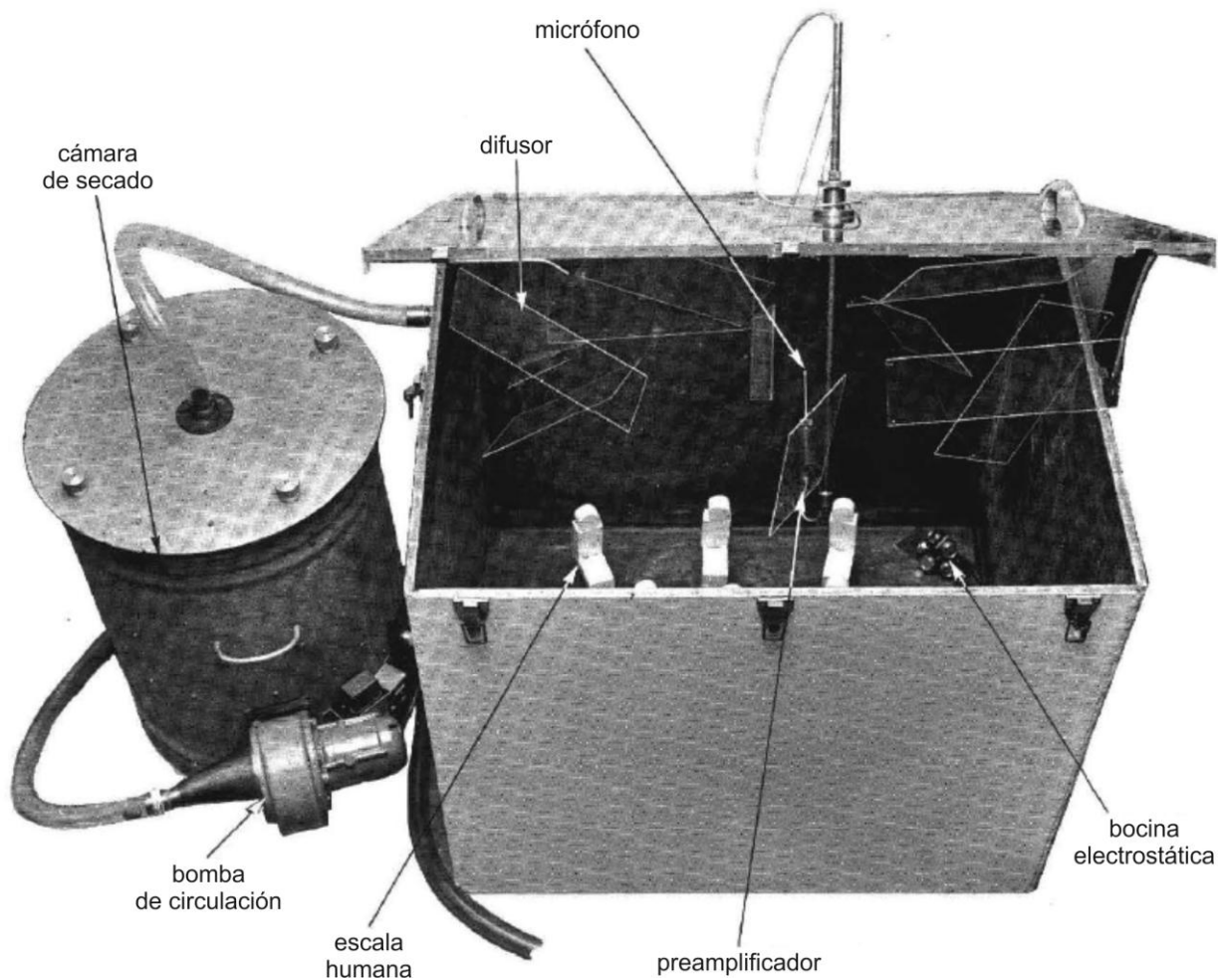


Fig. 1.40. Cámara reverberante escala 1:8 de la BBC. (Adaptada de: Spring et al., BBC, 1971)

A partir de la construcción de la cámara reverberante, la BBC realizó una serie de publicaciones hasta 1985 aproximadamente, en relación a la experimentación en modelos físicos a escala de los estudios de la *Maida Vale Studios*, así como de la instrumentación necesaria para realizar las mediciones en dichos modelos, tales como, la fuente sonora, los micrófonos, grabadoras, entre otros. También se definieron nuevos parámetros de calidad acústica de los espacios.

Las figuras 1.41 y 1.42, muestran algunos de los modelos físicos a escala de dos estudios de la BBC como parte de su experimentación.

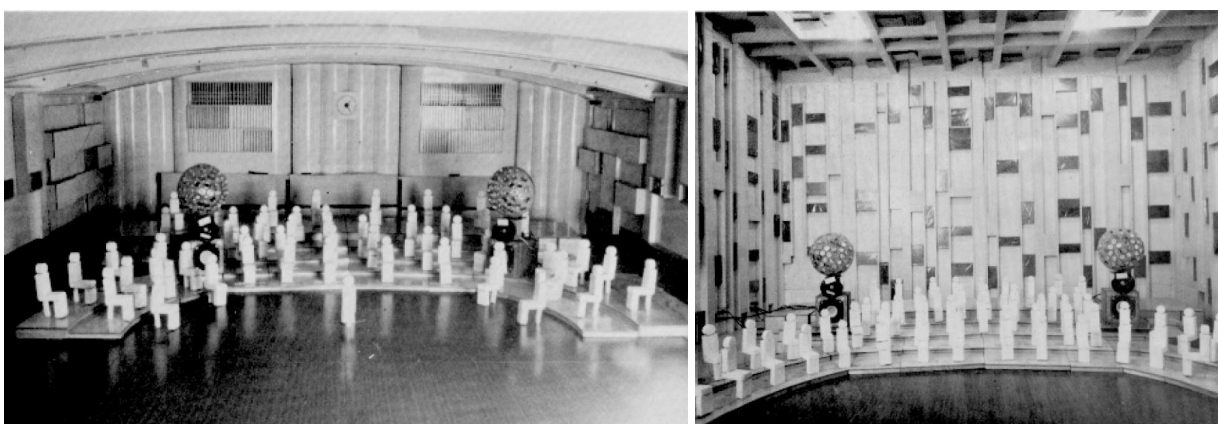


Fig. 1.41 y 1.42. Modelos físicos a escala de dos estudios de la BBC. (Mathers, BBC, 1981)

La experimentación en algunos casos, consistía en determinar el coeficiente de absorción sonora de ciertos materiales a partir de la cámara reverberante en miniatura, los cuales pudieran simular los empleados en el espacio real. Posteriormente, se medía el tiempo de reverberación en el modelo físico a escala y en el espacio real y se comparaban. Sin embargo, el RT entre ambos resultó relativamente distinto, como puede observarse en las figuras 1.43 y 1.44. Ambas figuras muestran las gráficas comparativas del RT medido en el modelo físico a escala (con el valor aumentado según el factor de escala) y en el espacio real de dos estudios de la BBC.

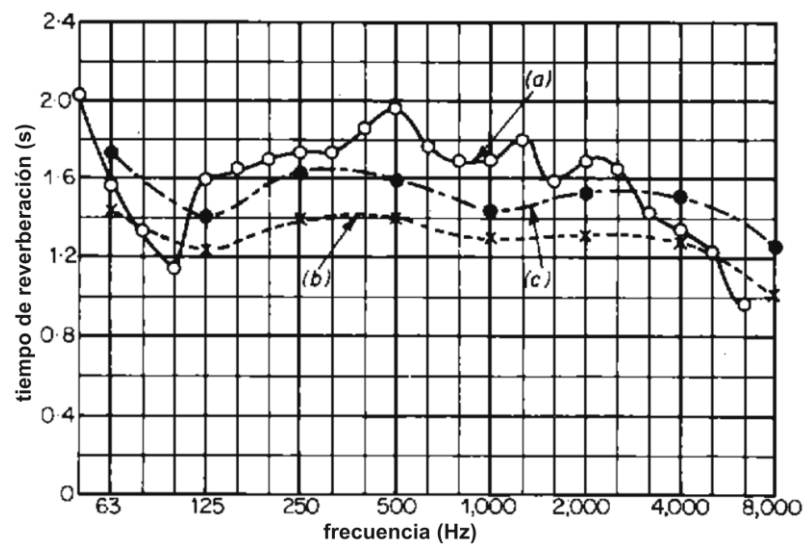


Fig. 1.43. Tiempo de reverberación de un estudio de la BBC, medidos en: (a) modelo físico a escala con 70 escalas humanas hechas de espuma de poliuretano, las cuales simulaban a los músicos, (b) espacio real con 60 integrantes de la orquesta y (c) espacio real con 70 miembros del coro. (Adaptada de: Harwood et al., BBC, 1972)

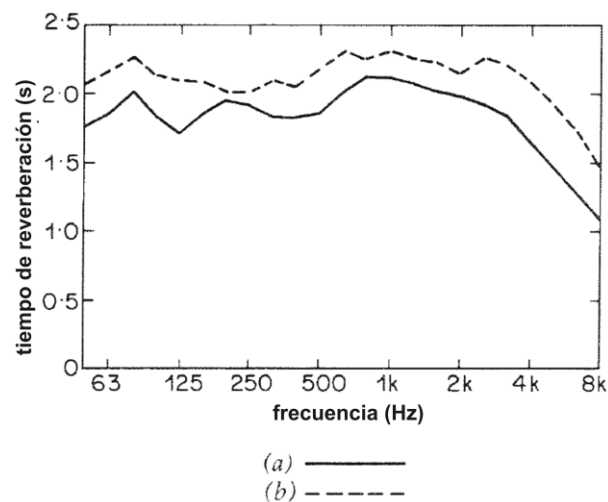


Fig. 1.44. Tiempo de reverberación de un estudio de la BBC, medidos en: (a) espacio real y (b) modelo físico a escala. (Adaptada de: Walker, BBC, 1984)

En ambos casos, la diferencia del RT medido en el espacio real y en el modelo físico a escala, en ocasiones es mayor a 1 segundo, lo que representa una diferencia considerable.

Puede decirse que a partir de estas investigaciones, se han realizado infinidad de experimentos en modelos físicos a escala, sin embargo el tema de la absorción sonora continua siendo un tema de interés debido al impredecible comportamiento de los llamados materiales acústicos (materiales porosos y fibrosos generalmente). Es importante señalar que el estudio de la absorción sonora en modelos físicos a escala, ha centrado su atención en elementos como butacas y audiencia, particularmente.

Otro aspecto importante a señalar, se debe a que la obtención de la absorción sonora de materiales empleados en modelos físicos a escala, siempre se ha realizado a partir de una cámara reverberante en miniatura, no encontrándose evidencia alguna de haberse medido a partir de un tubo de impedancias.

Aunado a lo anterior, se han determinado otras propiedades acústicas de los materiales, además del coeficiente de absorción sonora. Dichas propiedades se siguen estudiando debido a que se ha observado que también pueden definir el comportamiento acústico de los materiales (tema que se verá con mayor detalle en el Capítulo 4 de esta investigación).

1.2.3. Tendencias actuales

Según Ahnert, Feistel, y Schmitz (2003) a partir de la introducción de las computadoras a mediados de los años 80's del siglo XX, el uso de programas computacionales para el cálculo de las propiedades acústicas se incrementó de manera considerable, por lo que actualmente diversos programas de simulación acústica por computadora están disponibles en el mercado.

Dichos programas, surgen a partir de la necesidad de estudiar el comportamiento del sonido dentro de un espacio, basándose así en el principio de la trayectoria del sonido o rayos sonoros, tomando como referencia el comportamiento de los rayos de luz estudiados a partir de la óptica geométrica. Las figuras 1.45 a 1.47, muestran algunas de las primeras simulaciones acústicas por computadora con diferentes composiciones de espacios. En cada figura se puede observar la trayectoria de los rayos sonoros ya reflejados (lado izquierdo) y los rayos provenientes de la fuente sonora (lado derecho).

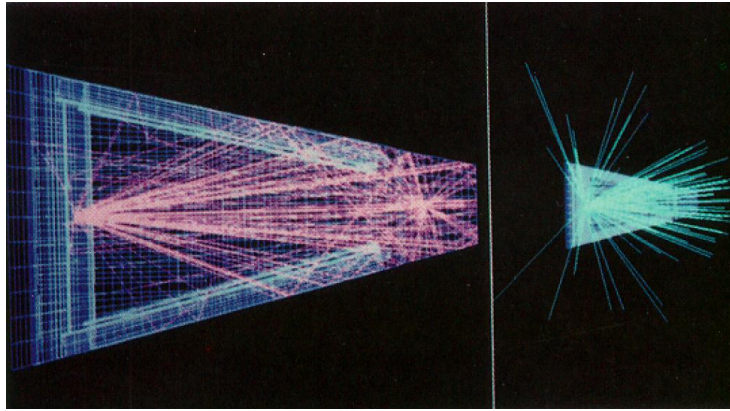


Fig. 1.45. Estudio del comportamiento del sonido en las primeras simulaciones por computadora. Espacio en forma de abanico. (Stettner y Greenberg, 1989)

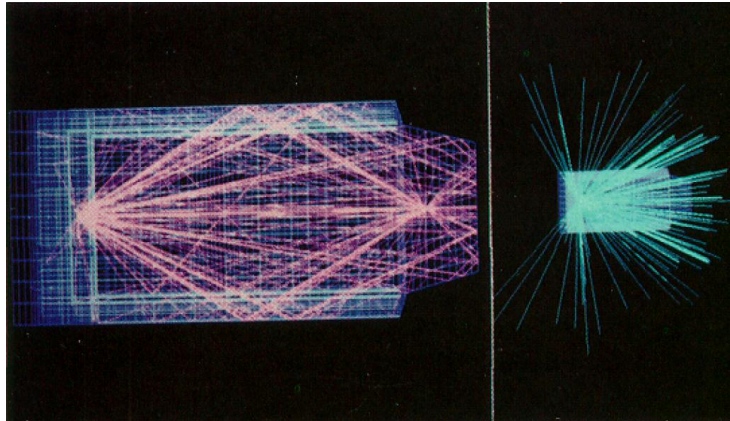


Fig. 1.46. Estudio del comportamiento del sonido en las primeras simulaciones por computadora. Espacio en forma de caja. (Stettner y Greenberg, 1989)

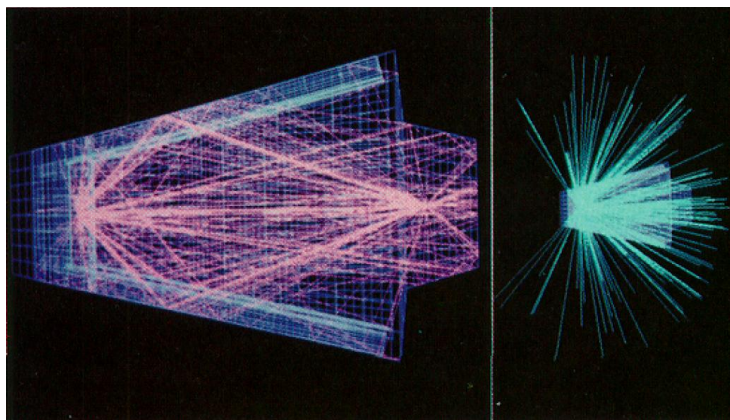


Fig. 1.47. Estudio del comportamiento del sonido en las primeras simulaciones por computadora. Espacio en forma de abanico invertido. (Stettner y Greenberg, 1989)

Sin embargo, se observaron algunas diferencias entre los rayos luminosos y los rayos sonoros. Según Stettner y Greenberg (1989), dichas diferencias consisten en: la velocidad de propagación del rayo sonoro es más lenta en relación a la de la luz; la longitud de onda del sonido es mayor; por último, el sonido transmite mayor energía al medio que lo rodea.

En relación a la primera diferencia, indica que la luz se propaga con tal velocidad que el ojo humano es incapaz de percibirlo, mientras que el oído es capaz de detectar pequeñas variaciones en la presión sonora debidas al retraso del sonido en propagarse. Señala que el oído humano puede percibir dichas variaciones dentro de los primeros 50 milisegundos. Respecto a la segunda diferencia, menciona que cuando las longitudes de onda del sonido se comparan con el límite y la irregularidad del espacio, el comportamiento del sonido en relación al de la luz no son simples reflexiones y refracciones, pues el sonido incluye efectos de difracción. Por último y en relación a la última diferencia, explica que los rayos luminosos presentan una pequeña pérdida de energía al viajar a través del aire, mientras que el sonido transforma su energía sonora en energía calorífica, debido a un proceso de fricción con los materiales y el medio de propagación.

Las características del sonido antes mencionadas han hecho más difícil predecir su comportamiento dentro de un espacio. Es por ello que los programas de simulación acústica por computadora están en constante desarrollo y mejoramiento. Hoy en día, dichos programas se han perfeccionado, convirtiéndose en una herramienta de diseño fiable y eficiente. Sin embargo, Ahnert et al. (2003) señalan que los modelos físicos a escala se continúan utilizando de forma paralela con los modelos de simulación acústica por computadora, pues a pesar de que éstos últimos proporcionan resultados más rápidos y favorables, tienen limitaciones en efectos de dispersión, difracción y elaboración del modelo.

Ahora bien, es importante señalar que los programas de simulación acústica por computadora se han basado en diversos métodos para demostrar la propagación del sonido dentro de un espacio. Los primeros métodos empleados fueron el Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method* (FME), por las siglas en inglés) y el Método de Elementos de Frontera (*Boundary Element Method* (BEM) por las siglas en inglés). Rindel (2000), señala que ambos métodos son relativamente eficientes (debido a su poco grado de exactitud) para el cálculo de la

propagación del sonido. Éstos, se basan en la resolución de una ecuación de onda a partir de modelos matemáticos.

Actualmente, los programas de simulación acústica por computadora se basan en dos métodos principalmente: el Método de Trazado de Rayos (*Ray Tracing Method*) y el Método de Fuente de Imagen (*Image Source Method*). Estos métodos son otra posibilidad de describir la propagación del sonido a partir del movimiento de las partículas.

Rindel (2000) explica que el Método de Trazado de Rayos utiliza un gran número de partículas que son emitidas en varias direcciones a partir de una fuente sonora. Dichas partículas son trazadas a través del espacio, las cuales irán perdiendo energía con cada reflexión ocurrida y de acuerdo al grado de absorción de la superficie incidente. Cuando una partícula golpea una superficie, ésta será reflejada, lo que indica que una nueva dirección en la propagación se ha definido. Por otra parte, señala que el Método de Fuente de Imagen se basa en el principio de una reflexión especular, la cual puede construirse geométricamente a partir de duplicar la fuente. Este método ayuda a describir las reflexiones tempranas dentro del espacio. Por otra parte, es un método que consume mucho tiempo, debido al alto número de reflexiones que necesita generar.

Es importante señalar que actualmente muchos de los programas de simulación acústica por computadora combinan los métodos antes señalados, convirtiéndolos en programas híbridos. Algunos de los programas que se encuentran en el mercado y que ayudan a la predicción del sonido dentro de un espacio arquitectónico son: *CATT – Acoustics*, *ODEON*, *RAMSETE* y *EASE*. Las figuras 1.48 a 1.55, muestran algunos ejemplos de estos programas de simulación acústica por computadora.

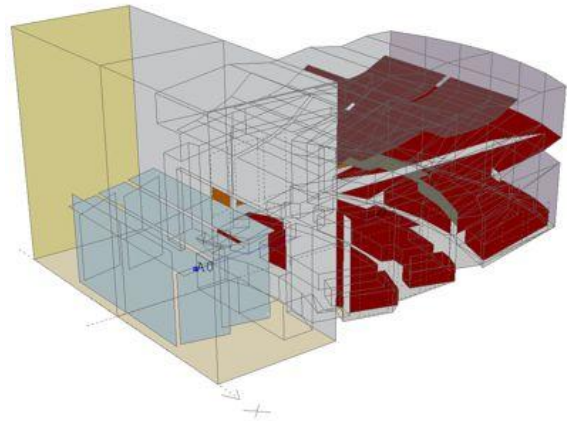
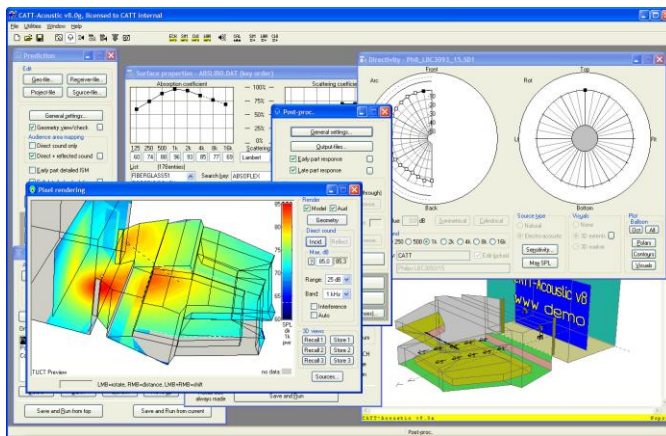


Fig. 1.48 y 1.49. Ejemplo de simulaciones en CATT - Acoustics.

(<http://www.acousticfield.jp/product/cattacoustic.html>) y (<http://www.wsdg.com/>) respectivamente

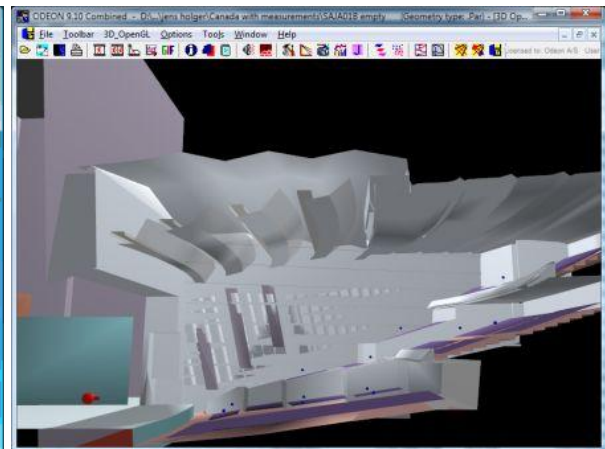
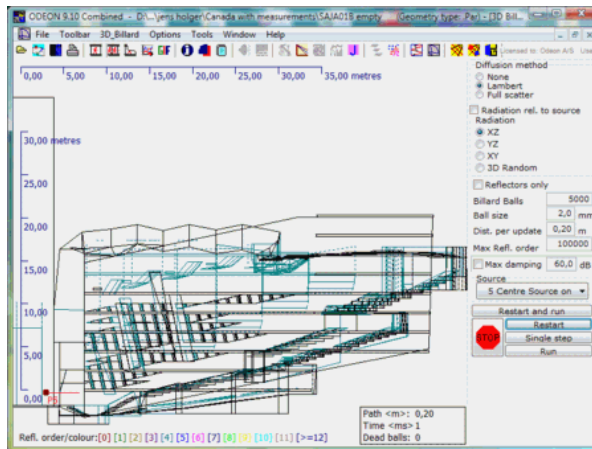


Fig. 1.50 y 1.51. Ejemplo de simulaciones en ODEON. (<http://www.odeon.dk/>)

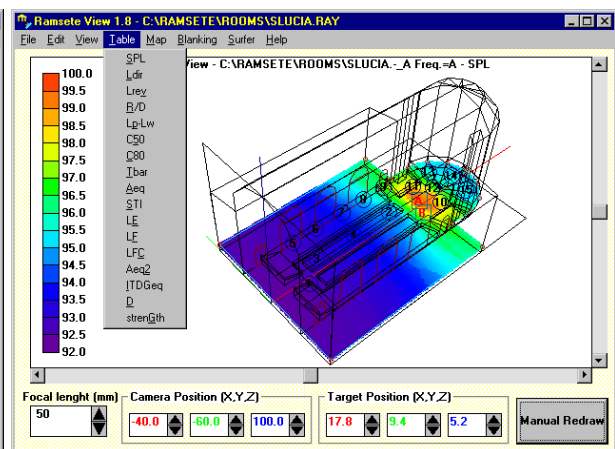
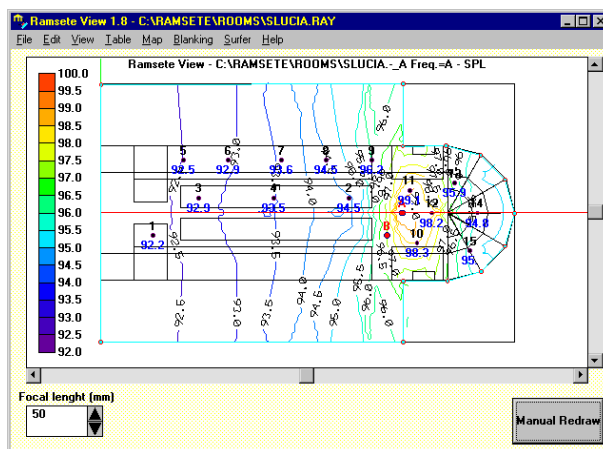


Fig. 1.52 y 1.53. Ejemplo de simulaciones en RAMSETE. (<http://pcfarina.eng.unipr.it/>)

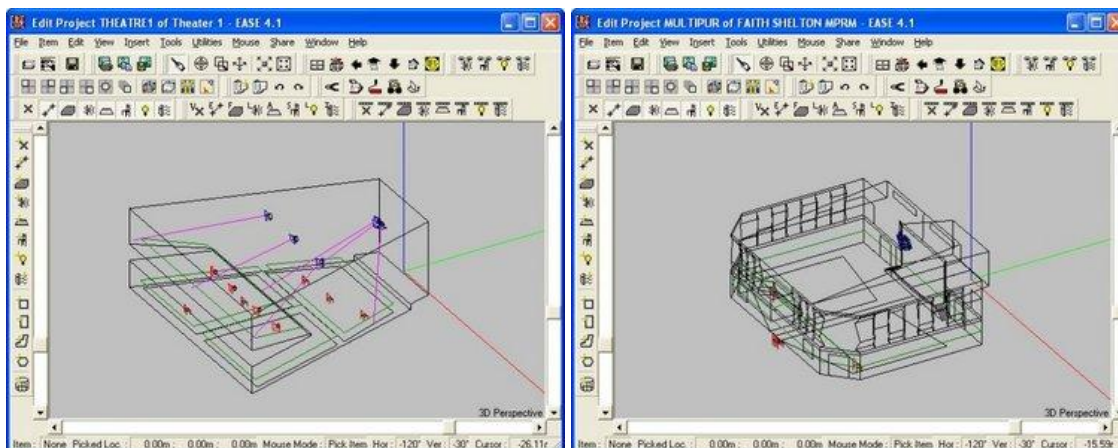


Fig. 1.54 y 1.55. Ejemplo de simulaciones en *EASE*.

(http://avaxhome.ws/software/software_type/scientific/Engineering/Simulator.html)

En los programas antes mencionados, pueden emplearse algunos recursos para predecir el comportamiento acústico de espacios aún no construidos, o bien para corregir la acústica de alguno ya construido:

- Respuesta al impulso¹⁹: describe el comportamiento del sonido en el espacio a partir de reflexiones.
- Inteligibilidad: unidad de medida de la cantidad de palabras entendidas en relación a palabras emitidas.
- Nivel sonoro: describe la distribución del nivel sonoro dentro de un espacio.
- Auralización: puede escucharse de forma muy aproximada la acústica de un recinto.

Según Gonchar (2011), dentro del campo de la simulación acústica de recintos por computadora, una de las técnicas más empleadas para la predicción del comportamiento del sonido dentro de un espacio, es la auralización y tanto los ingenieros como los acústicos, emplean este recurso para un mejor entendimiento de la correlación entre la percepción de las cualidades acústicas y las características arquitectónicas del espacio. Dicho proceso constituye una aproximación de la acústica del recinto en relación al volumen, forma y características físicas de los materiales (coeficiente de absorción principalmente) que lo componen.

¹⁹ Según Gonchar (2011), la respuesta al impulso puede considerarse como una característica única de cada espacio, debida a las características físicas del mismo, de la fuente sonora y de la ubicación del receptor dentro del espacio.

En relación a la absorción sonora, los programas de simulación acústica por computadora tienen preestablecida una base de datos con coeficientes de absorción sonora de distintos materiales empleados en la construcción, tales como: concreto, tabiques, vidrio, entre muchos otros. Los datos provienen de la medición de dichos materiales a partir del método de cámara reverberante.

1.3. Conclusiones

Puede decirse que a partir de la definición del concepto del tiempo de reverberación por Sabine a principios del siglo XX, los métodos de diseño para la especulación del comportamiento del sonido en un espacio han evolucionado considerablemente, desde modelos físicos a escala, hasta modelos de simulación por computadora.

Dichos métodos se han enfocado en el estudio y comprensión del sonido dentro de los espacios en relación al volumen y a las propiedades absorbentes de las superficies que los componen. También se han enfocado en la determinación de parámetros que califiquen la calidad acústica de los recintos.

A pesar de que los métodos de simulación por computadora pareciera que han desplazado a los modelos físicos a escala, estos últimos se siguen empleando de manera paralela, puesto que los programas computacionales aún cuentan con algunos inconvenientes para la simulación del sonido, mientras que en los modelos físicos a escala el comportamiento del sonido es real. Sin embargo, éstos presentan una complicación en la reproducción de las superficies absorbentes en diferentes escalas, que simulen las del espacio real.

Según lo anterior, puede decirse que la absorción sonora dentro de un espacio es un elemento esencial para la predicción del comportamiento del sonido dentro del mismo, por lo que el estudio de las propiedades absorbentes de los materiales sigue en constante estudio.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE ACÚSTICA
ARQUITECTÓNICA

2. Fundamentos teóricos de acústica arquitectónica

2.1. El sonido

El sonido se origina cuando un cuerpo produce una perturbación en un medio elástico (líquido, gaseoso o sólido), así que, podríamos definirlo como una vibración en uno de estos medios y que puede ser detectado por el oído humano a través de una fluctuación en la membrana del tímpano, a la cual llamamos sensación auditiva.

El medio por el cual se propaga el sonido debe poseer masa y elasticidad. Por lo tanto el sonido no puede propagarse a través del vacío (Harris, 1995, p. 1.1).

2.1.1. Generación y propagación del sonido

Se le llama fuente sonora al elemento que entra en vibración con el medio y que por lo tanto genera un sonido, como puede ser la voz humana, o mejor dicho, las cuerdas vocales que se abren y cierran, o el hacer sonar algún instrumento musical, como las cuerdas de un violín. El número de fuentes sonoras es infinitamente diverso y de presencia común en nuestra vida diaria.

El sonido viaja a través de ondas sonoras, las cuales producen compresiones y enrarecimientos en las partículas del medio por el cual se propagan. Las partículas se empujan entre sí y regresan a su estado normal (fig. 2.1).

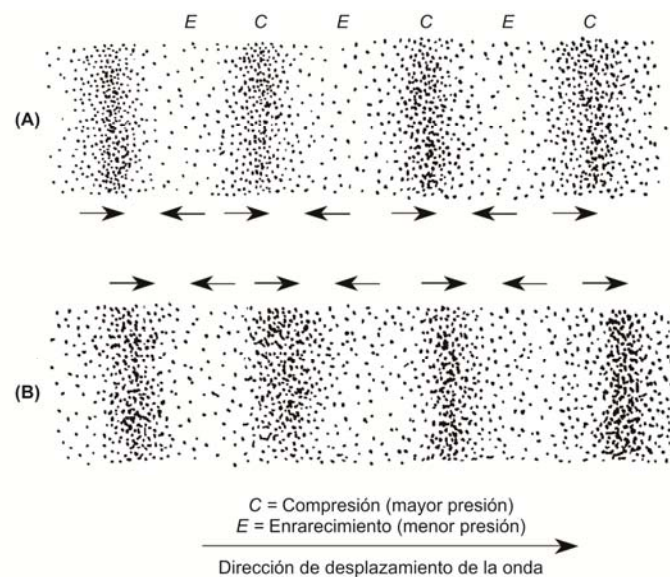


Fig. 2.1. Ondas sonoras viajando a través de un medio. (A) La onda causa que las partículas de aire se presionen (compresión) y se extiendan (enrarecimiento). (B) Un instante después la onda se mueve ligeramente hacia la derecha. (Adaptada de: Everest y Pohlmann, 2009, p. 5)

Carrión (1998, p. 27), explica que si golpeamos una membrana elástica como la de un tambor, ésta provocará una oscilación. La membrana se desplazará hacia afuera y las partículas de aire cercanas a ella crearán zonas de compresión y enrarecimiento.

Existen diferentes formas de movimiento de las ondas en distintos medios. Las ondas sonoras en el aire se propagan en sentido longitudinal (fig. 2.2).

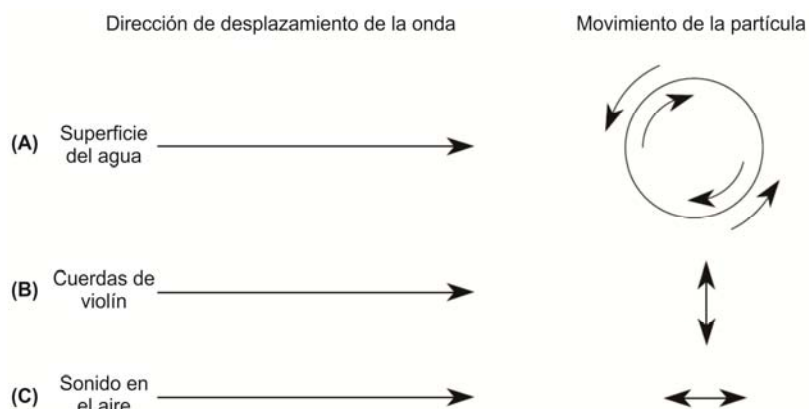


Fig. 2.2. El movimiento de las ondas puede ser (A) de manera circular, (B) transversal y (C) longitudinal dependiendo del medio por el que se propaguen. (Adaptada de: Everest y Pohlmann, 2009, p. 4)

2.1.2. Velocidad del sonido

La velocidad del sonido es la velocidad a la que viajan las ondas sonoras a través de un medio dado (Méndez, 1983).

Pierre Simón de Laplace⁵ fue el primero en calcular la velocidad del sonido (1816). La expresión que determinó es (ecuación 2.1):

$$c = \sqrt{\gamma Pa/p} \quad (\text{ec.2.1})$$

donde, ***Pa*** es la presión atmosférica ambiental, ***p*** es la densidad del fluido y ***γ*** es la relación del calor específico del fluido a presión y volumen constantes.

Como se observa en la ecuación 2.1, la temperatura es un factor determinante para establecer la velocidad del sonido en el aire, por ejemplo, la velocidad del sonido a una temperatura de 20 °C es aproximadamente 344 m/s, mientras que a una temperatura de 22 °C será de aproximadamente 345 m/s.

Existen variaciones en la dirección del sonido influenciada por la temperatura. En un día soleado, con la tierra caliente, se da una reducción de la velocidad del sonido con la altura, por lo tanto el sonido tenderá a ir hacia arriba (fig. 2.3), mientras que durante una noche fría, se da un aumento de velocidad con la altura y las ondas sonoras tenderán a ir hacia abajo (fig. 2.4).

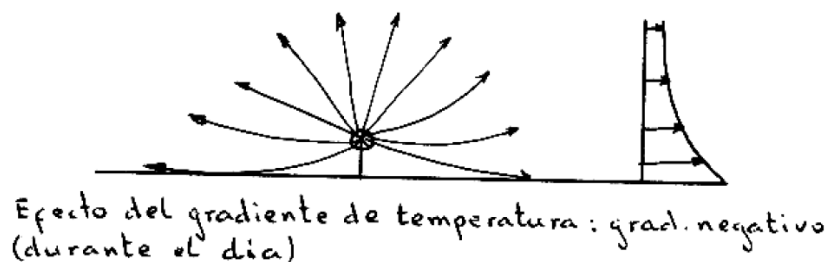


Fig. 2.3. Gradiente de temperatura negativo. (Pérez, 1989)

⁵ Pierre Simón de Laplace (1749 – 1827) fue un astrónomo, físico y matemático francés que inventó y desarrollo la transformada de Laplace y la ecuación de Laplace. (<http://es.wikipedia.org/>)

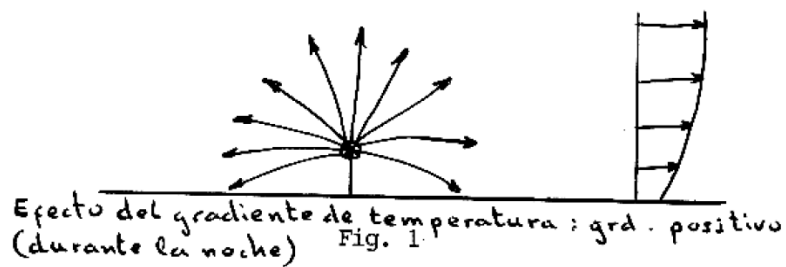


Fig. 2.4. Gradiente de temperatura positivo. (Pérez, 1989)

2.1.3. Longitud de onda, periodo y frecuencia del sonido

La distancia entre dos compresiones, o dos enrarecimientos, consecutivos del medio se denomina **longitud de onda** (fig. 2.5) y se representa frecuentemente con el símbolo λ (Arau, 1999, p. 9).

El **periodo** (fig. 2.6) expresa el tiempo de oscilaciones mínimo requerido para que las partículas tengan el mismo estado de vibración y se expresa con el símbolo T (Arau, 1999, p. 11).

La **frecuencia** (fig. 2.7) expresa el número de oscilaciones o variaciones por segundo y se representa con el símbolo f (Arau, 1999, p. 11). Se mide en Hertz (Hz) o en ciclos por segundo (c/s).

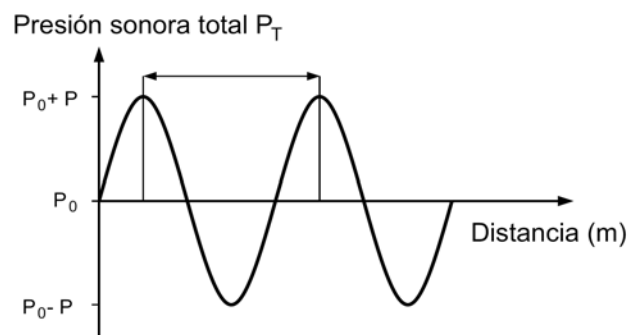


Fig. 2.5. Longitud de onda del sonido. (Carrión, 1998, p. 33)

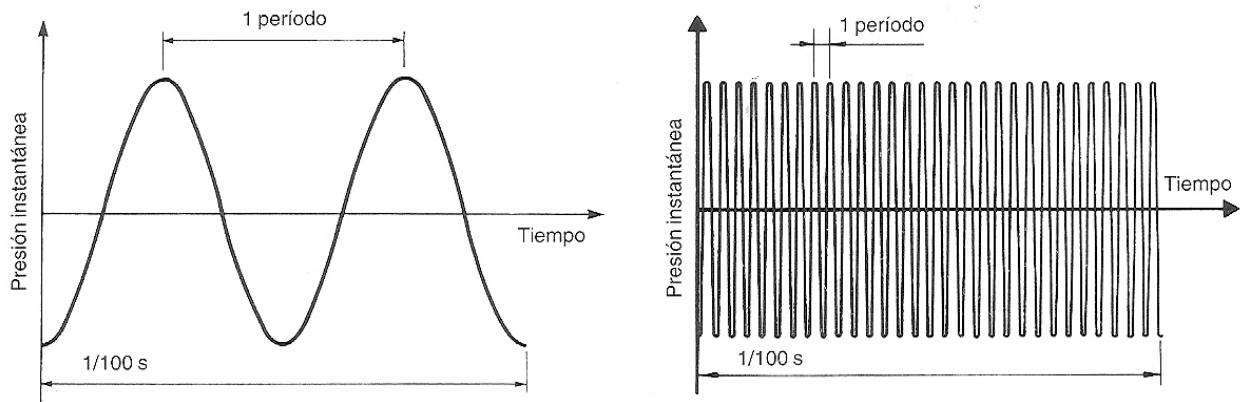


Fig. 2.6. Ejemplos de periodos de dos longitudes de onda distintos. (Arau, 1999, p. 12)

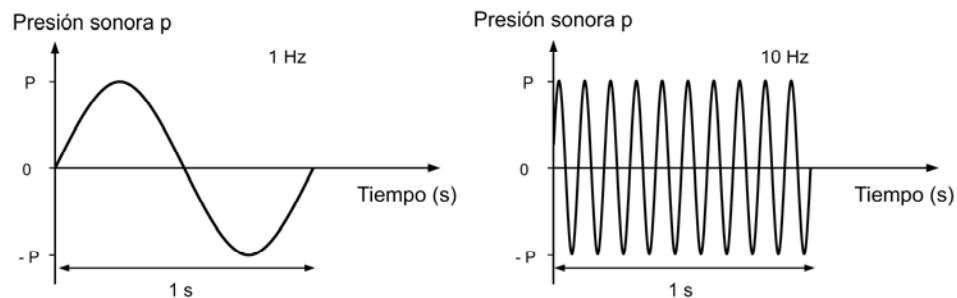


Fig. 2.7. Oscilaciones de onda a diferentes frecuencias, de 1 y 10 Hz. (Carrión, 1998, p. 29)

La figura 2.8 muestra como la frecuencia y la longitud de onda siempre están relacionadas de manera directa. A mayor frecuencia mayor longitud de onda y viceversa.

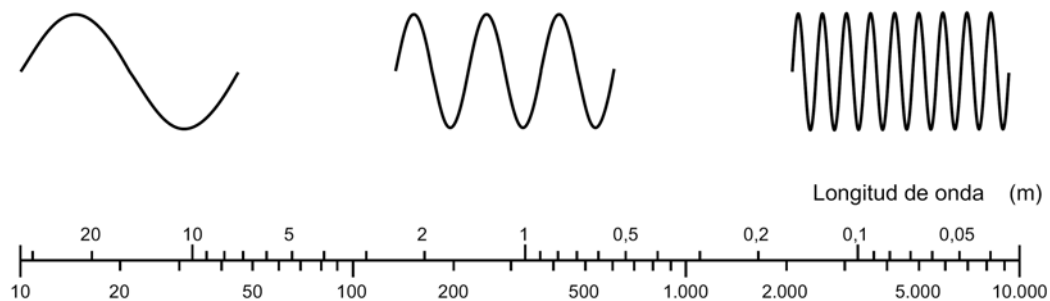


Fig. 2.8. Relación entre longitud de onda y frecuencia. (Carrión, 1998, p. 34)

Como se ha mencionado, las ondas sonoras se producen cuando un cuerpo entra en vibración, sin embargo muy pocos cuerpos producen vibraciones en una sola frecuencia, la mayoría vibran en combinación de varias frecuencias produciendo una onda compleja, la cual estará

dominada por una frecuencia fundamental o primer armónico, que será la que tenga más potencia sonora. Uno de los pocos objetos que produce vibraciones en una sola frecuencia es el diapasón.

La frecuencia es la magnitud que representa el aspecto físico del fenómeno del sonido. El tono o sensación de agudeza es el aspecto psicofisiológico que lo define (Arau, 1999, p. 12). Por lo anterior tenemos que a una frecuencia baja le corresponde un tono grave, mientras que para una frecuencia alta un tono agudo.

La banda de frecuencias audible para una persona joven y sana, va desde los 20 Hz (sonidos graves) hasta los 20 kHz (sonidos agudos). Los sonidos por debajo de los 20 Hz se llaman infrasonidos y por encima de los 20 kHz, ultrasonidos, ambos incapaces de ser escuchados por el oído humano.

Por su parte, Llinares, Llopis y Sancho (2008, p. 113), hacen una clasificación de las frecuencias en graves, medias o altas como se observa en la tabla 2.1:

20 - 360 Hz	frecuencias graves o bajas
360 - 1 400 Hz	frecuencias medias
1 400 - 20 000 Hz	frecuencias agudas o altas

Tabla 2.1. Clasificación de frecuencias según Llinares et al. (Adaptada de: Llinares et al. 2008, p. 113)

2.1.4. Bandas de octava

Debido a que el oído humano escucha de manera logarítmica, las frecuencias se han dividido en escalas logarítmicas que se denominan octavas. Una octava se define como el intervalo que separa una frecuencia de otra de manera doble.

La tabla 2.2, muestra las octavas utilizadas y que están estandarizadas según la Norma ISO 266⁶:

⁶ Norma que especifica las frecuencias preferidas para mediciones acústicas.

Frecuencias centrales de las bandas de octava										
16	31.5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	16 000

Tabla 2.2. Bandas de octava expresadas en Hertz (Hz).

Para estudios más precisos y una mayor resolución, éstas pueden dividirse en tercios de octava.

Arau (1999, p. 12) menciona que por conveniencia, en acústica arquitectónica en correspondencia con las escalas musicales, las octavas pueden dividirse con respecto a su tono y frecuencia en:

- Octavas de frecuencia entre 125 y 250 Hz en tonos graves
- Octavas de frecuencia entre 500 y 1 000 Hz en tonos medios
- Octavas de frecuencia entre 2 000 y 4 000 Hz en tonos agudos

2.1.5. Nivel de sonido y Decibel

Se le llama nivel de presión sonora (SPL) al nivel de sonido en un ambiente cualquiera, del cual se ha hablado es la perturbación de un medio a causa de la vibración de un cuerpo. Para medir la presión sonora de dicho ambiente, la unidad de medida es el Pa (Pascal), el cual debido a su amplio margen de unidades se representa en términos de niveles llamados decibeles (dB), los cuales son resultado de aplicar escalas logarítmicas para una mejor manipulación de datos.

Para conocer la presión sonora en decibeles para cualquier sonido en donde la presión sea conocida, se determina la siguiente expresión (Ecuación 2.2):

$$L_p = 20 \log P/P_0 \quad (\text{ec.2.2})$$

donde, L_p es el nivel de presión sonora expresado en dB, P es la presión determinada en Pa y P_0 es la presión de referencia en Pa.

El umbral de audición es aquella presión mínima requerida para provocar en el oído una sensación auditiva. El umbral de audición del oído humano va desde el umbral de audición (20

μPa), hasta el umbral del dolor ($100 \mu\text{Pa}$), por lo que el oído no responde a la misma sensibilidad en todas las frecuencias, así que, hay presiones sonoras que son incómodas⁷ para el ser humano.

Existe una relación entre el cambio de nivel de presión sonora y el efecto subjetivo que provoca:

- Si el cambio es sólo 1 dB, será imperceptible
- Si el cambio es de 3 dB entonces será apenas perceptible
- Si el cambio son 5 dB, entonces será claramente perceptible
- Si el cambio son 10 dB, entonces el incremento será considerable, percibiéndose subjetivamente como el doble en intensidad

La tabla 2.3, muestra distintas variaciones de presión sonora de diferentes fuentes sonoras.

FUENTE SONORA	NIVEL DE PRESIÓN SONORA SPL (dB)	VALORACIÓN SUBJETIVA DEL NIVEL
Despegue avión (a 60 m)	120	Muy elevado
Edificio en construcción	110	
Martillo neumático	100	
Camión pesado (a 15 m)	90	Elevado
Calle (ciudad)	80	
Interior automóvil	70	
Conversación normal (a 1 m)	60	Moderado
Oficina, aula	50	
Sala de estar	40	
Dormitorio (noche)	30	Bajo
Estudio de radiodifusión	20	

Tabla. 2.3. Niveles de presión sonora de diversas fuentes sonoras. (Carrión, 1998, p. 35)

⁷ El oído humano es muy sensible a la zona de frecuencias comprendida entre los 2 000 a 5 000 Hz.

2.2. El sonido dentro de los espacios arquitectónicos

Según Llinares et al. (2008, p. 121), mencionan que la Acústica Arquitectónica abarca tres grandes temas:

- El que estudia la protección contra el ruido y vibraciones en las edificaciones y que se denomina **Aislamiento Acústico**.
- El que estudia los fenómenos del sonido dentro del recinto y mejora la calidad acústica del mismo mediante intervenciones en su interior y que se define como **Acondicionamiento Acústico**.
- El que asegura la protección de ruidos exteriores de las zonas urbanas a las edificaciones y crea ambientes sonoros adecuados en espacios abiertos y se conoce como **Acústica Urbanística**.

Esta investigación se centra en el Acondicionamiento Acústico de los recintos, o sea, a la mejora de la calidad acústica de los mismos, ya que como dicen Llinares et al. (2008), “La calidad viene definida por distintos parámetros según sea el tipo de mensaje sonoro, ya que no se exige lo mismo en la percepción de un mensaje oral, palabra hablada, que en la de uno musical” (p. 121).

2.2.1. Comportamiento del sonido dentro de un recinto

Si una fuente sonora emite un sonido dentro de un recinto cerrado, la onda sonora se propagará en diferentes direcciones. Si se ubica a un oyente en una posición cualquiera del espacio, éste recibirá dos tipos de sonidos: el directo⁸ y el reflejado⁹ concretamente las primeras reflexiones (fig. 2.9); el primero dependerá de la distancia de la fuente sonora al receptor y el segundo obedecerá en gran medida a las formas arquitectónicas¹⁰ del recinto, así como del grado de absorción sonora de las superficies.

⁸ El sonido directo es aquel que llega directamente al receptor desde la fuente y sin ningún tipo de interferencia.

⁹ El sonido reflejado es aquel que surge como consecuencia de las diferentes reflexiones que sufre la onda sonora al incidir sobre un material.

¹⁰ Las primeras reflexiones definirán en gran medida el carácter acústico del recinto de acuerdo a las formas arquitectónicas del mismo.

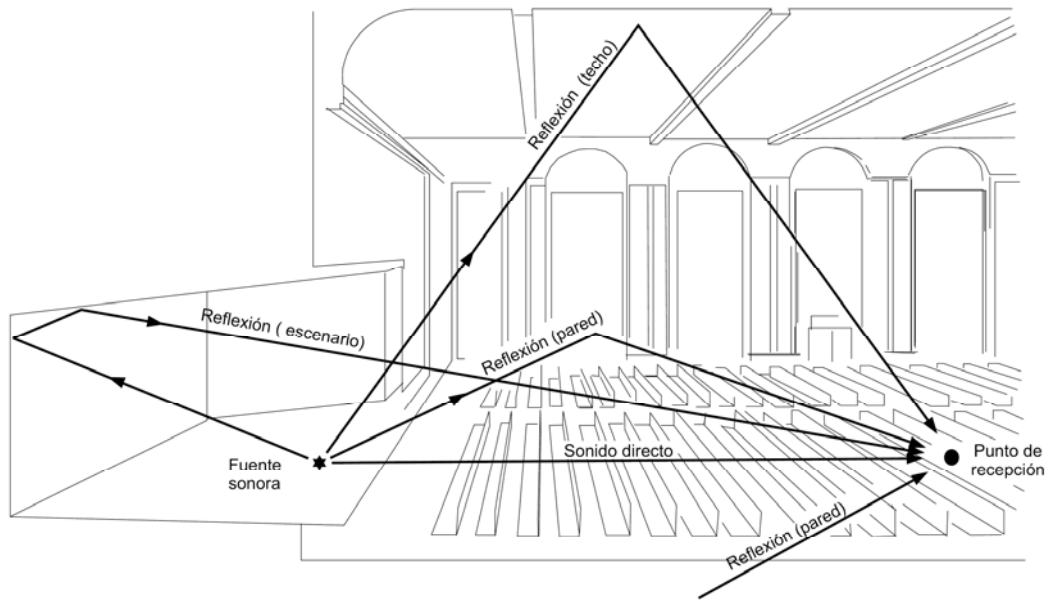


Fig. 2.9. Llegada del sonido directo e indirecto (primeras reflexiones). (Carrión, 1998, p. 51)

Cuando la onda sonora incide directamente sobre alguna superficie del recinto, ésta no sólo se refleja, sino que sufre otros efectos por causa del material: parte de la onda se reflejará, otra parte se absorberá y otra se transmitirá a través de éste (fig. 2.10).

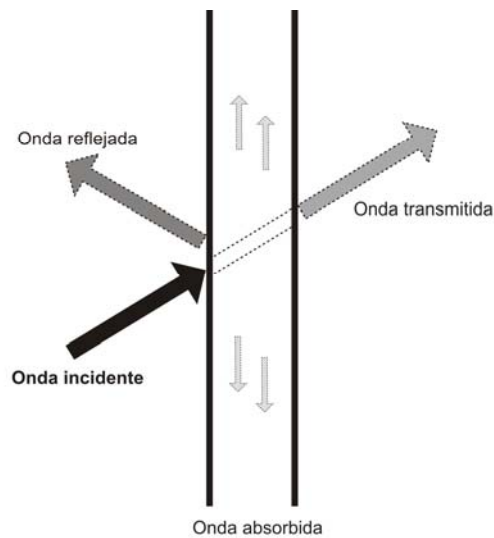


Fig. 2.10. Comportamiento del sonido ante un material.

Es por ello que la energía del sonido reflejado depende en gran medida del grado de absorción sonora de los materiales empleados en el recinto.

Cabe mencionar que lo descrito anteriormente sucede en todos los materiales, algunos reflejarán más, otros menos, algunos absorberán más que otros y otros transmitirán en diferente medida el sonido hacia el espacio adyacente, de acuerdo a su composición.

La figura 2.11, muestra diferentes efectos producidos por la incidencia de una onda ante una superficie absorbente, reflejante y difusa sobre un diagrama polar, según Carrión (1998, p. 123).

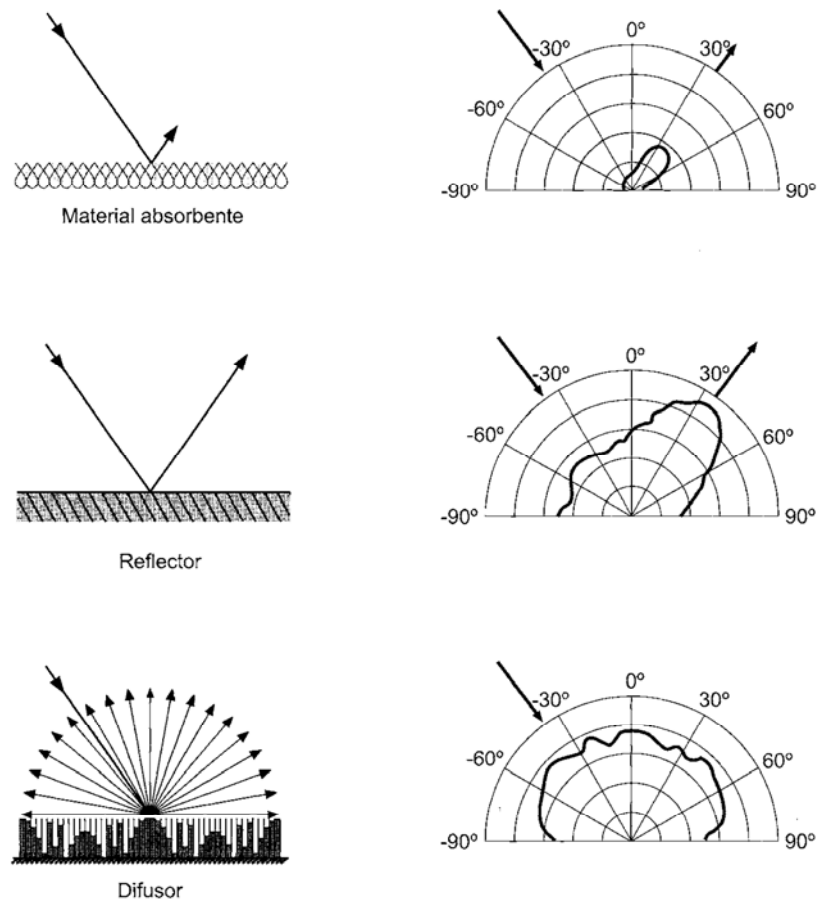


Fig. 2.11. Efectos de una onda ante una superficie absorbente, reflejante y difusa. (Carrión, 1998, p. 123)

Se puede observar que gran parte de la energía de la onda es absorbida y muy poca reflejada ante una superficie absorbente; la energía incidente sobre una superficie reflejante se reflejará casi con su misma energía y de manera especular; y por último, la onda incidente sobre una superficie difusora, se reflejará de manera uniforme en todas direcciones y su energía se distribuirá.

Podría decirse que la reflexión es el efecto principal y más importante del sonido, seguido de la absorción, aunque existen otros, como lo menciona Doelle (1972, p. 23) en su esquema (fig. 2.12).

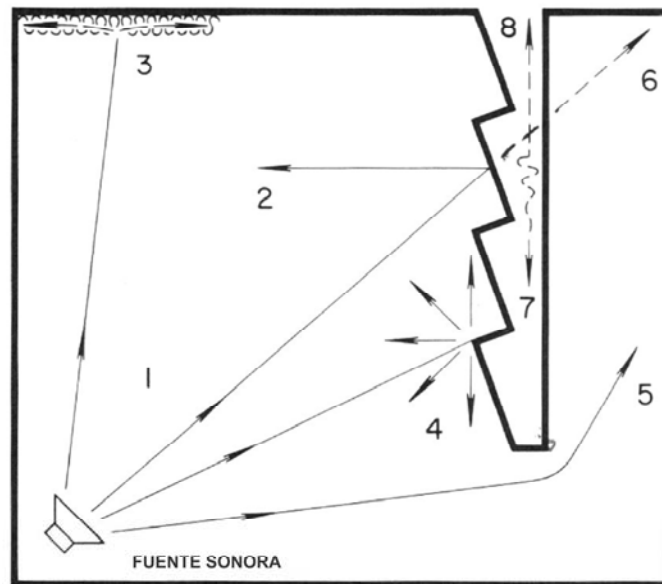


Fig. 2.12. Comportamiento del sonido dentro de un espacio. (Adaptada de: Doelle, 1972, p. 23)

Se observa que ante la presencia de diferentes elementos, por ejemplo muros con diferente geometría, éstos cambiarán las características de las ondas sonoras. Así tenemos: (1) sonido directo, (2) reflexión, (3) absorción, (4) dispersión, (5) desviación o difracción, (6) transmisión, (7) disipación de la energía y (8) transmisión vía estructural. A continuación se definen a mayor detalle los efectos del sonido antes mencionados.

2.2.1.1. Reflexión

Everest y Pohlmann (2009, p.95) mencionan que las reflexiones aportan información importante sobre el tamaño, la forma y composición de los límites del espacio. Además señalan que las reflexiones ayudan a definir el sonido característico de un espacio.

La reflexión del sonido es muy parecida al comportamiento de la reflexión en la luz y por lo tanto sigue las mismas reglas: el ángulo de incidencia será igual al ángulo de reflexión y creará una

“imagen” espejo u onda reflejada, a este efecto se le conoce como reflexión especular (fig. 2.13).

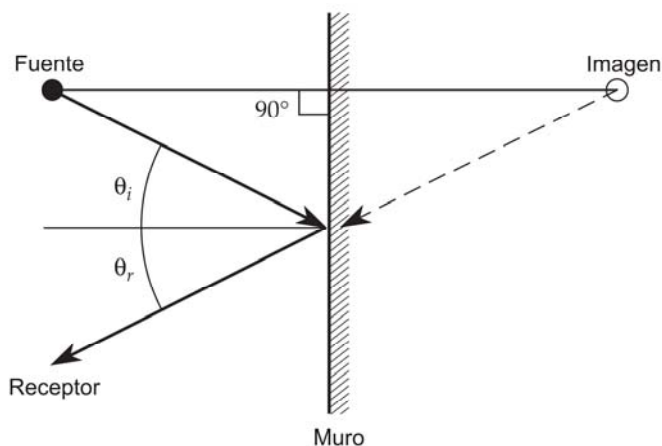


Fig. 2.13. Reflexión especular. (Adaptada de: Everest y Pohlmann, 2009, p. 96)

Como se ha mencionado, si una fuente emite un sonido, la onda se propaga en todas direcciones e incide sobre las superficies produciendo las primeras reflexiones o sonido indirecto; sin embargo son presentes otras reflexiones que llegan después de las primeras y que se denominan reflexiones tardías y constituyen la cola reverberante. Las primeras reflexiones se dan dentro de los primeros 100 ms desde la llegada del sonido directo, mientras que las reflexiones tardías después de este periodo, este fenómeno se explica mejor en la figura 2.14.

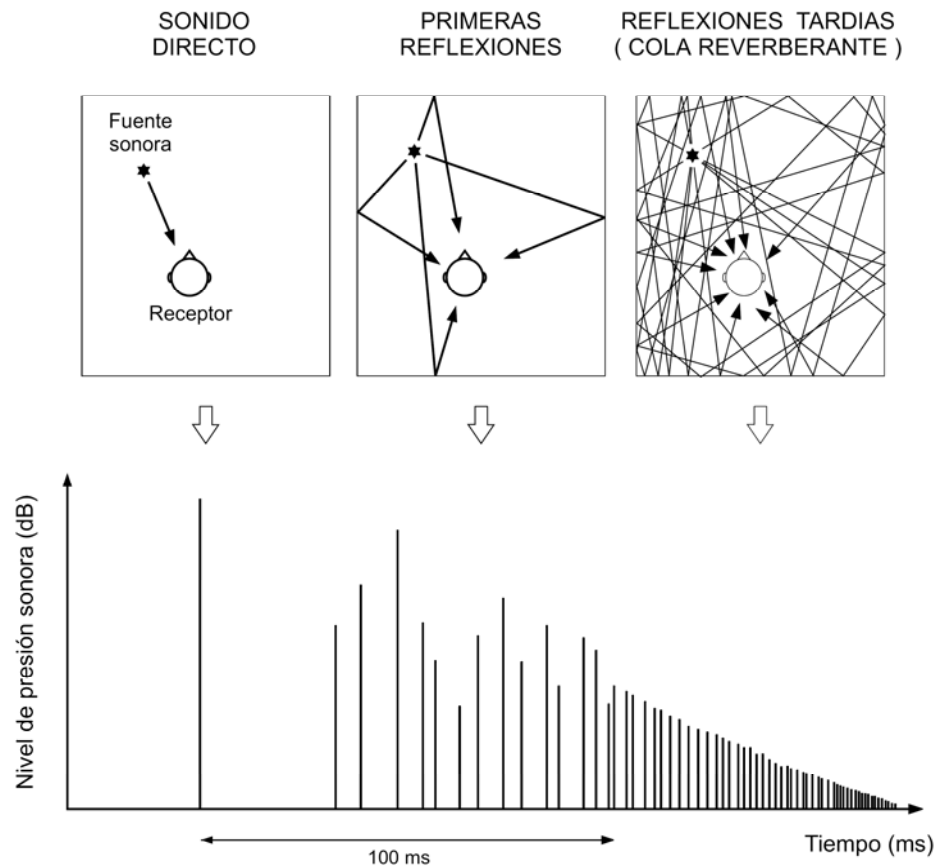


Fig. 2.14. Sonido directo, primeras reflexiones y reflexiones tardías. (Carrión, 1998, p. 50)

Carrión (1998, p. 71), menciona que la reflexión del sonido dentro de un espacio se debe al empleo de elementos reflectores utilizados para la generación de reflexiones útiles hacia la zona del público.

Sin duda, las reflexiones son la base para el estudio del comportamiento del sonido en un recinto (fig. 2.15), mediante el análisis de las ondas sonoras representadas por rayos acústicos. La parte de la acústica que se encarga del estudio de la distribución de las ondas sonoras en los espacios arquitectónicos se denomina Acústica Geométrica.

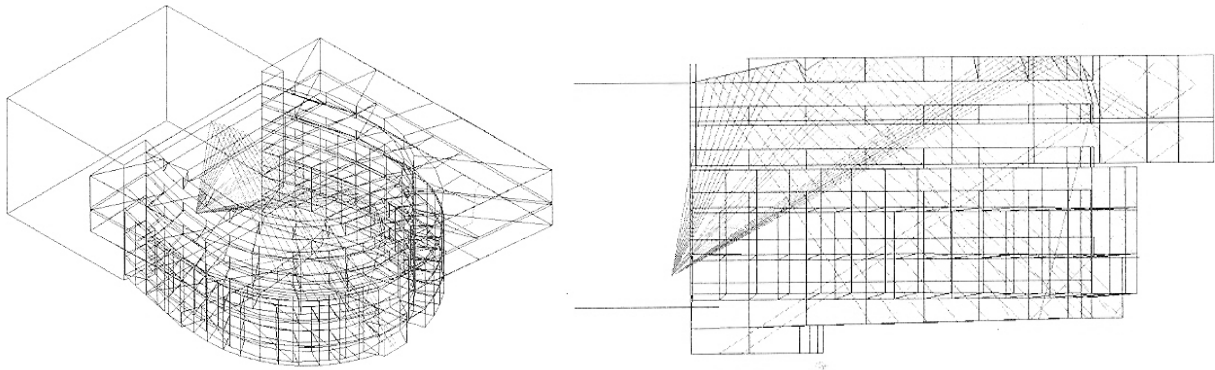


Fig. 2.15. Representación de reflexiones en un recinto (La Fenice, concurso internacional). (Arau, 1999, p. 57)

Una vez conociendo el comportamiento de las reflexiones dentro de un recinto, nos permitirá proponer una geometría más adecuada al momento de diseñar un espacio arquitectónico.

2.2.1.2. Difusión

Según Cowan (1994, p. 11) la difusión es la extensión uniforme del sonido que se produce cuando las ondas sonoras se reflejan en superficies de curvatura convexa o irregulares (fig. 2.16).

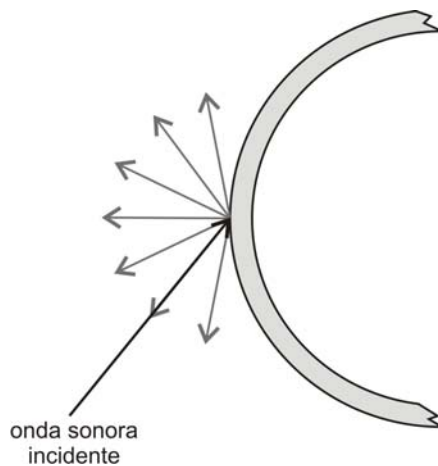


Fig. 2.16. Incidencia de una onda sonora sobre una superficie de curva convexa.

Por otra parte, Carrión (1998) define que, “si la superficie presenta irregularidades de dimensiones comparables con la longitud de onda, se produce una reflexión de la onda incidente en múltiples direcciones. Dicho fenómeno se conoce con el nombre de difusión sonora” (p. 52).

Randall y Ward (1960) establecen algunos criterios a manera de sugerencia para considerar un campo difuso, los más significativos son:

- El tiempo de reverberación debe ser el mismo en todas las posiciones del recinto.
- El carácter de decaimiento debe ser esencialmente el mismo para todas las frecuencias.
- El carácter del decaimiento debe ser independiente a las características de direccionalidad de las mediciones con micrófono.

Actualmente, la difusión es una herramienta de diseño indispensable para distribuir con mayor eficacia el sonido dentro de un recinto y ayudar a que la energía de campo reverberante llegue a los oídos de los espectadores de igual forma desde todas las direcciones.

El diseño de la difusión sonora tiene como objetivo distribuir de manera uniforme toda la gama de frecuencias audibles a lo largo de todo el espacio arquitectónico y así crear un ambiente envolvente y aumentar el grado de impresión espacial. Según Carrión (1998, p. 124), cuanto mayor sea el grado de impresión espacial, mejor será la valoración subjetiva de la calidad acústica del recinto.

Carrión (1998, p. 71) menciona que la difusión del sonido dentro de un espacio se debe principalmente a la presencia de elementos difusores utilizados para dispersar de manera uniforme y en múltiples direcciones la energía sonora incidente.

La difusión se ha utilizado en el diseño acústico de salas de concierto, estudios de grabación y cabinas de audio. Algunas salas de concierto del periodo clásico lograron la difusión a partir de la existencia de ornamentación, nichos, molduras decorativas, estatuas, techos artesonados, irregularidades y relieves en las superficies, aunque actualmente se recurre al diseño de la

difusión sonora en los espacios (fig. 2.17). Por otra parte, los estudios de grabación, cabinas de audio y otros espacios, utilizan paneles difusores, normalmente desmontables (fig. 2.18).



Fig. 2.17. Diseño de difusión sonora en el Auditorio de Poitiers (Théâtre Auditorium de Poitiers – TAP), Francia. (<http://www.flickr.com/>)



Fig. 2.18. Ejemplo de aplicación de difusores marca Auralex, tipo *WavePrism*. (<http://www.auralexelite.com/>)

2.2.1.3. Difracción

Cowan (1994, p. 11) define como difracción al fenómeno donde las ondas sonoras se curvan o pandean aparentemente alrededor de un muro o barrera. Este fenómeno ocurre cuando la longitud de onda incidente sobre una barrera es comparable o mayor que la altura y anchura de dicha barrera.

Everest y Pohlmann (2009, p. 109) mencionan que las frecuencias bajas (sonidos graves) son más susceptibles a difractarse ante la presencia de un obstáculo que las frecuencias altas (sonidos agudos) (fig. 2.19). Es por ello que las barreras contra el ruido sirven para evitar tonos agudos, pero no graves, a menos que la altura de la barrera sea exageradamente grande.

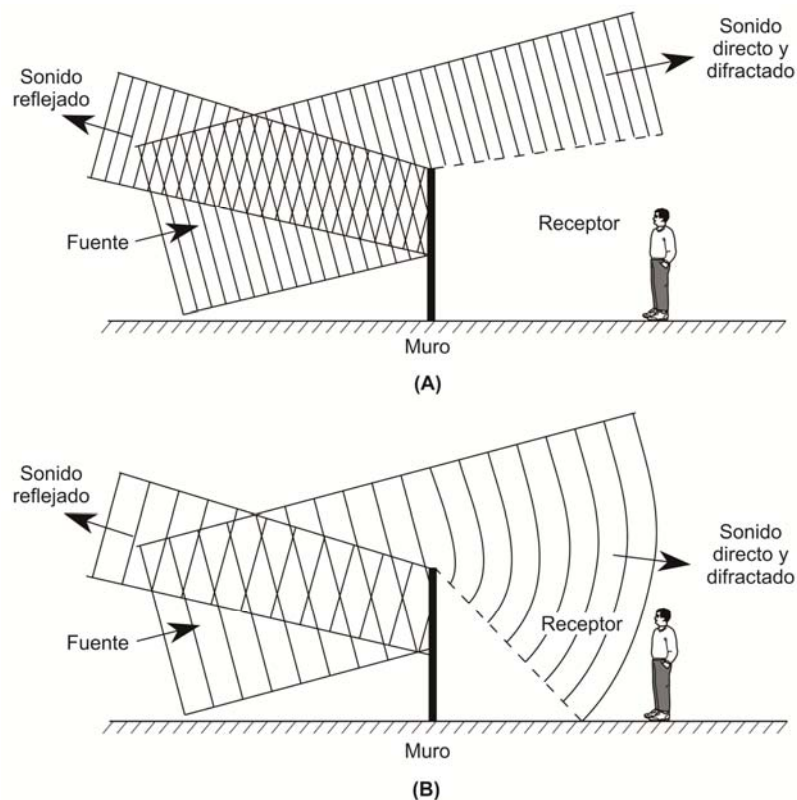


Fig. 2.19. Se observa como una onda sonora incide sobre una barrera contra el ruido. (A) En frecuencias altas el sonido se atenúa satisfactoriamente hacia el otro lado, mientras que (B) a frecuencias bajas el sonido se atenúa menos debido a la alta difracción cuando incide contra el muro. El sonido pasa justo arriba de la barrera y la envuelve pasando hacia el otro lado. (Adaptada de: Everest y Pohlmann 2009, p. 110)

La difracción también se presenta cuando una onda atraviesa una abertura de dimensiones pequeñas en comparación con el tamaño de su longitud de onda (fig. 2.20).

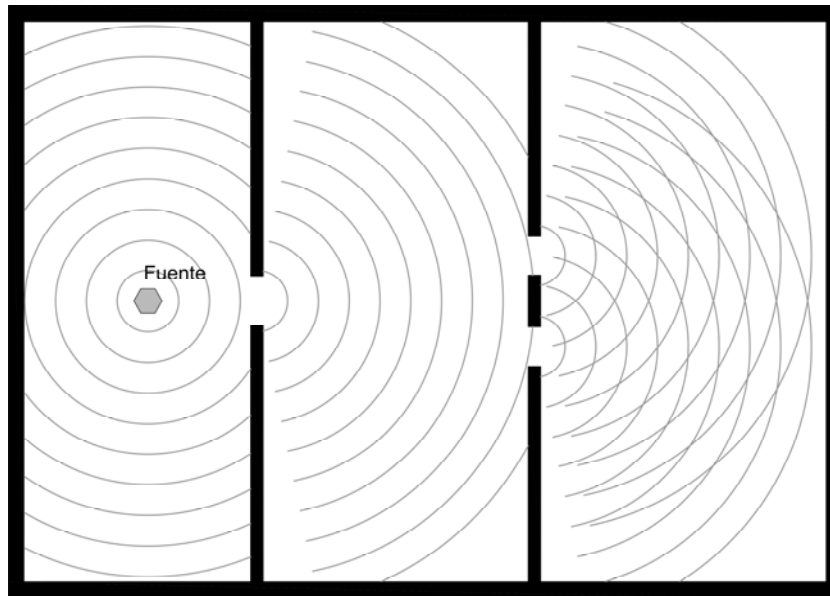


Fig. 2.20. Difracción de ondas sonoras causadas por aberturas.

2.2.1.4. Absorción

Arau (1999, p. 175) explica que: si se tiene un frente de ondas que chocan con una superficie, parte de la energía se reflejará y otra se transmitirá a través del material hacia el otro lado del mismo, sin embargo, una porción de esta última se transformará por mecanismos diversos en energía calorífica en la superficie. A dicho fenómeno se le conoce como proceso de absorción acústica y se representa esquemáticamente en la figura 2.21.

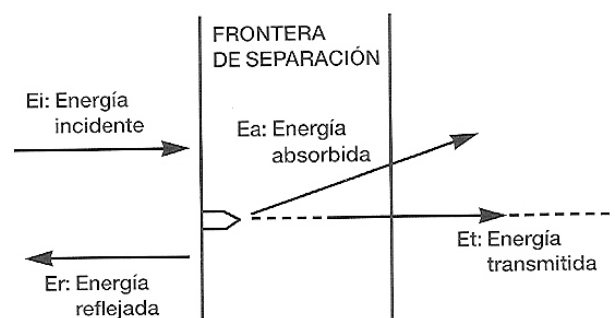


Fig. 2.21. Proceso de absorción acústica. (Adaptada de: Arau, 1999, p 175)

Ahora bien, para conocer el índice de absorción de los materiales se recurre a lo que se conoce como coeficientes de absorción sonora. Según Harris (1995):

El coeficiente de absorción del sonido de un material es una medida de la propiedad absorbente del sonido del material. Es la relación (expresada como número decimal) de la potencia sonora incidente aleatoriamente que es absorbida y no reflejada por el material (p. 30.3).

Los coeficientes de absorción sonora de cada material varían de acuerdo a cada frecuencia. Por ello se expresa en bandas de octava, normalmente entre 125 Hz a 4 000 Hz. A continuación se muestra un ejemplo del coeficiente de absorción sonora de materiales comunes en la construcción en sus distintas frecuencias (Tabla 2.4):

Materiales	Coeficientes de absorción sonora					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz
Ladrillo pintado	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Placa de yeso	0.29	0.1	0.05	0.04	0.07	0.09
Madera	0.15	0.11	0.1	0.07	0.06	0.07
Vidrio	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Cortina 475 g/m ²	0.07	0.31	0.49	0.75	0.7	0.6
Lana de vidrio 25 mm	0.15	0.25	0.4	0.5	0.65	0.7

Tabla 2.4. Ejemplo de coeficientes de absorción sonora de algunos materiales
(<http://sonoflex.com/fonac/>)

Cabe mencionar que la cantidad de energía absorbida aparte de depender del tipo de material, también influyen factores como su composición física, forma, espesor y montaje.

Arau (1999, p. 178 - 179) hace una clasificación de materiales absorbentes de acuerdo a su composición física, los cuales se enlistarán de manera general, pues se profundizará más en el tema en el Capítulo 4:

- Grupo 1: materiales porosos flexibles y no flexibles (yesos acústicos, concreto poroso, fibras de vidrio, lanas de roca, entre otros).
- Grupo 2: materiales flexibles y porosos, recubiertos con una superficie no porosa y ligera.

- Grupo 3: paneles montados a una distancia de separación de una pared rígida (paneles ligeros).
- Grupo 4: paneles perforados con material absorbente en su interior.

Dentro del campo de la acústica arquitectónica la absorción se usa principalmente para controlar el tiempo de reverberación con objeto de obtener el más adecuado en función de la actividad para la que se haya previsto dicho espacio, también se emplea para eliminar ecos¹¹, evitar modos de resonancia¹² y controlar ruidos en los espacios.

2.2.2. Fenómenos acústicos dentro de un recinto

2.2.2.1. Reverberación

Llinares et al. (2008, p. 127), mencionan que después de un gran número de reflexiones, la energía sonora disminuye de manera gradual hasta que desaparece por completo después de un cierto tiempo. A este fenómeno donde existe una superposición de ondas sonoras que se van retrasando en el tiempo debidas a reflexiones sucesivas se denomina reverberación.

También mencionan que desde el punto de vista de la Acústica Ondulatoria, el tiempo de reverberación se define como el descenso de energía o debilitamiento de cada una de las ondas que se propagan en una sala, después de dejar de recibir energía de la fuente sonora.

Sabine¹³ fue el primero en definir el concepto del fenómeno de la reverberación. Lo definió como el tiempo necesario para que el nivel de presión acústica en el recinto, una vez que ha cesado la emisión de la fuente, disminuya en 60 dB. También puntualiza que dicho fenómeno depende fuertemente de la cantidad de materiales absorbentes dentro del recinto, así como de su volumen.

¹¹ El eco es una repetición del sonido inicial o también podría definirse como una onda reflejada (retrasada) con una intensidad tal, que es percibida perfectamente. El eco tiene un retardo superior a los 50 ms.

¹² Una resonancia es esencialmente la coincidencia de ondas estacionarias en distintas direcciones y a distintas frecuencias.

¹³ Wallace Clement Sabine (1868 – 1919) es considerado el “Padre de la Acústica Arquitectónica”. Se hablará más de él en el Capítulo 3 de esta investigación.

Hoy en día, el tiempo de reverberación es el parámetro más utilizado en el diseño acústico de los espacios, por ser el primero en determinar la calidad acústica de los mismos.

Se profundizará más en este tema en el Capítulo 3 de esta investigación.

2.2.2.2. Resonancia

Una resonancia¹⁴ es la coincidencia de ondas estacionarias en distintas direcciones y a distintas frecuencias en un espacio cerrado. Es este efecto se le conoce como modos propios de un espacio.

Los modos propios de un espacio dependen fundamentalmente de la forma, el tamaño del local y del grado de absorción de las superficies.

Carrión (1998) menciona que el estudio de los modos propios se realiza mediante la Acústica Ondulatoria y la Acústica Geométrica. También menciona que el número de modos propios es ilimitado, ya que depende de la frecuencia y que la presencia de ellas provocará concentraciones de energía, a la que define como “coloración”.

Sólo cuando se trata de recintos en forma de paralelepípedo con superficies muy reflectantes y lisas, los modos propios se pueden calcular de una manera muy sencilla a partir de la fórmula de Rayleigh (Ecuación 2.3):

$$f_{k,m,n} = 172,5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (\text{ec.2.3})$$

Donde, **172.5** es la mitad de la velocidad del sonido, **L_x**, **L_y** y **L_z** son las dimensiones de la sala en metros, **k**, **m**, **n** son valores enteros (0, 1, 2, 3, etc.).

¹⁴ La resonancia es una cualidad que tiene cualquier cuerpo susceptible de entrar en vibración.

La figura 2.22 representa dos espacios diferentes, el primer espacio (a) es de forma rectangular con dimensiones óptimas y el segundo (b) de forma cúbica con mayor susceptibilidad a concentración de modos propios.

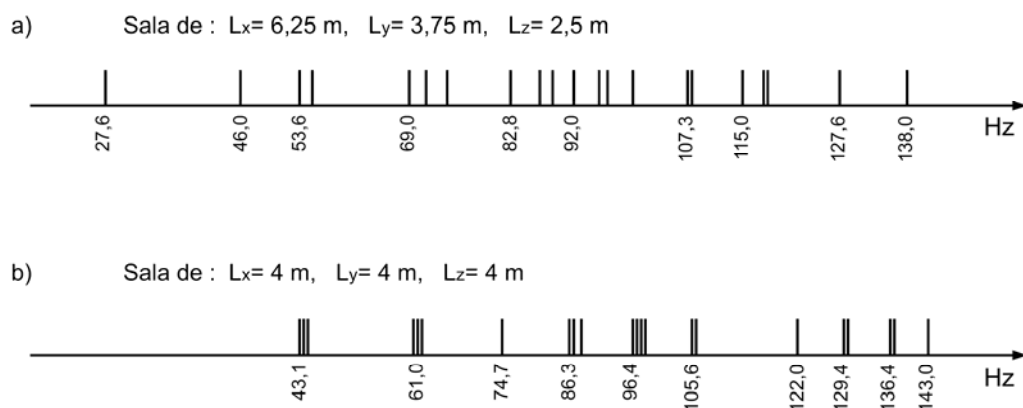


Fig. 2.22. Modos propios de dos espacios distintos, uno rectangular (a) y el otro cúbico (b). (Carrión, 1998, p. 57)

Carrión (1998, p. 58) presenta una gráfica (Gráfica de Bolt) (fig. 2.23) que indica la relación óptima entre longitud, anchura y altura de un espacio. Cabe mencionar que las relaciones van en función de una altura normalizada de 1m.

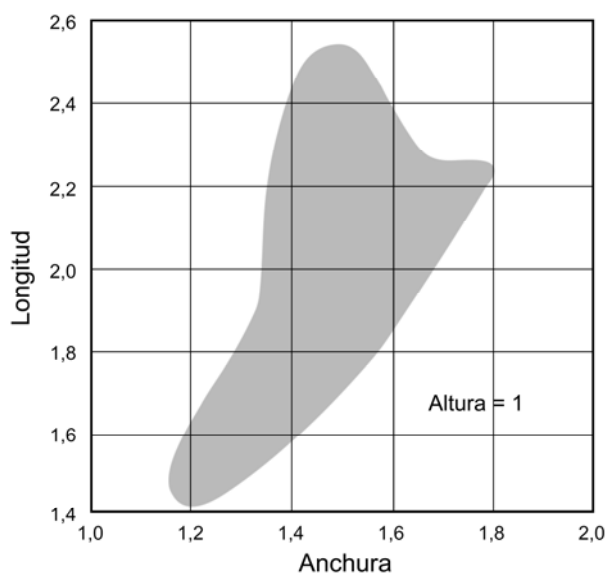


Fig. 2.23. Relaciones óptimas entre longitud, anchura y altura (de 1m) de un espacio para evitar resonancias. (Carrión, 1998, p. 58)

TIEMPO DE REVERBERACIÓN Y OTROS PARÁMETROS DE CALIDAD ACÚSTICA

3. Tiempo de reverberación y otros parámetros de calidad acústica

3.1. Reverberación

En el Capítulo 2 se definió el concepto de reverberación desde dos enfoques distintos; el primero desde la Acústica Arquitectónica, donde se mencionó que después de un gran número de reflexiones la energía sonora disminuye de manera gradual hasta que desaparece por completo después de un cierto tiempo. A ese fenómeno donde existe superposición de ondas sonoras que se van retrasando en el tiempo debidas a reflexiones sucesivas, se denomina reverberación; el segundo enfoque parte desde el punto de vista de la Acústica Ondulatoria como el decaimiento de la energía o debilitamiento de cada una de las ondas que se propagan en una sala, después de dejar de recibir energía de la fuente sonora (Llinares et al. 2008, p. 127).

A pesar de que hay infinidad de definiciones acerca del tiempo de reverberación, la de Wallace Sabine³⁰ (en 1902), sigue siendo la base de todas ellas. Sabine fue el primero en definir el concepto del fenómeno de la reverberación³¹, señalando que es el tiempo necesario para que el nivel de presión acústica en el recinto disminuya en 60 dB una vez que ha cesado la emisión de la fuente. También puntualiza que dicho fenómeno depende considerablemente de la cantidad de materiales absorbentes dentro del recinto, así como de su volumen.

Sabine establece la ecuación 3.1 para calcular el tiempo de reverberación de un espacio, señalando que éste es inversamente proporcional al promedio del coeficiente de absorción de

³⁰ Wallace Clement Sabine, era profesor del departamento de Física de la Universidad de Harvard en temas como óptica y electricidad. Sin embargo, sus intereses cambiaron cuando le fue solicitado buscar alguna solución para mejorar la acústica de la nueva Sala de Conferencias del *Fogg Art Museum* en 1895. Sabine abordó el problema comparando la acústica del *Fogg* con otro recinto de acústica aceptable, conocido como el Teatro Sanders. Es por ello que se centra en él para determinar dicho problema. Durante los siguientes años, Sabine y un grupo de asistentes pasaron cada noche moviendo materiales entre ambos recintos y realizando pruebas. Un día pidió prestados cientos de cojines del Sanders y con un órgano de tubos y un cronómetro realizó infinidad de mediciones del tiempo requerido de cada una de las frecuencias en decaer hasta que el sonido fuera inaudible. Después de un cierto tiempo (1898), Sabine entendió los resultados que las mediciones arrojaban y descubrió que la reverberación de un recinto era inversamente proporcional a la cantidad de absorción del mismo. (Addis, 2009)

³⁰ En un principio, Sabine le llamó al fenómeno de reverberación el “tiempo residual” de un espacio. La duración de este “tiempo residual” dependía de la cantidad de materiales absorbentes dentro del espacio, así como de la capacidad de absorción y transmisión de los muros.

³¹ En un principio, Sabine le llamó al fenómeno de reverberación el “tiempo residual” de un espacio. La duración de este “tiempo residual” dependía de la cantidad de materiales absorbentes dentro del espacio, así como de la capacidad de absorción y transmisión de los muros.

los materiales, el cual puede ser calculado a partir de una media aritmética del coeficiente de todas las superficies en el espacio. Según Carrión (1998), la fórmula del RT que sigue siendo aceptada a nivel internacional por su sencillez de cálculo es la de Sabine.

$$RT\ 60_{Sab} = \frac{0.163 \cdot V}{A} = \frac{0.163 \cdot V}{S \cdot \alpha_{Sab}} \quad (\text{ec.3.1})$$

donde **RT 60_{Sab}** es el tiempo de reverberación en segundos (s), **V** es el volumen del espacio expresado en metros cúbicos (m³), **A** es el total de absorción de los materiales y elementos según Sabine (el total de absorción se define como el coeficiente de absorción de cada superficie multiplicada por su área de superficie) se expresa en metros cuadrados (m²); **S** es el área de las superficies y **α_{Sab}** es el coeficiente de absorción de los materiales en una determinada frecuencia.

Retrocediendo al pasado, entre las teorías más antiguas del fenómeno de reverberación, sin duda la de Sabine es el punto de partida para siguientes investigaciones y la base de las llamadas teorías clásicas, como la de Franklin en 1903, Jaeger en 1911 y Buckingham en 1925. Todos ellos partieron de la hipótesis de que el campo sonoro en un espacio es difuso (Díaz, 1997).

Una segunda ola de teorías surgen y con mayor influencia, basadas en la existencia de un campo difuso, tales como: Eyring y Norris entre 1930 y 1932, Schuster y Waetzmann, Millington y Sette entre 1932 y 1933 y Kuttruff. Posteriormente surgen otras teorías, la cuales toman en cuenta la dimensionalidad del espacio, entre ellos se encuentran Fitzroy en 1959, Arau en 1988 y Neubauer en el 2000. De algunos de ellos puede decirse lo siguiente, según Rossell y Arnet (2002):

- **Eyring y Norris** (1930 – 1932) usaron la misma fórmula de Sabine, pero introdujeron un logaritmo para los coeficientes de absorción. Su fórmula considera una distribución binomial para el número de reflexiones. La fórmula también incluye lo que Eyring había mejorado años antes con respecto a un cálculo más exacto de los coeficientes de absorción de los materiales.

Por otra parte, su hipótesis asume que la energía se pierde de manera gradual. Así mismo, es importante señalar que la fórmula de Eyring y Norris es más precisa cuando se utiliza para calcular el RT de espacios con un alto nivel de absorción.

- **Millington y Sette** (1932 – 1933) definieron un nuevo promedio para el cálculo del coeficiente de absorción, donde solucionan el hecho de que se obtengan valores mayores a la unidad (situación que es imposible físicamente).
- **Kuttruff** (diversos años) propuso una distribución del sonido generado a partir de la *Ley de Lambert*³².
- **Fitzroy** (1959) fue el primero en definir el tiempo de reverberación en tres direcciones, correspondientes al techo, suelo y muros laterales y frontales (x, y, z), donde un promedio del coeficiente de absorción de cada dirección es calculado. También, fue el primero en considerar la ubicación del material dentro de un espacio. Su fórmula puede ser utilizada para predecir el tiempo de reverberación de campos sonoros no uniformes.
- **Arau** (1988) utiliza el promedio geométrico de tres periodos de reverberación en cada dirección. También define la energía de decaimiento correspondiente a las tres direcciones.
- Por último, **Neubauer** (2000) plantea una corrección de la fórmula de Fitzroy, reduciendo el cálculo a sólo dos direcciones, la de muros laterales y frontales y la del suelo y el techo. Enfatiza en las superficies correspondientes al suelo y techo, argumentando que en esas direcciones se ubica la audiencia, que es la mayor área de absorción en un espacio.

3.1.1. Medición del tiempo de reverberación

Ahora bien, aunque podríamos definir el tiempo de reverberación mediante la fórmula de Sabine, Eyring o cualquier otro, éstas no nos permiten evidenciar de manera gráfica el

³² Según León et al. (2007), esta ley supone que la energía difusa dispersada en cada dirección es proporcional al coseno que ésta forma con la normal a la superficie.

comportamiento del fenómeno en el espacio, es por ello que el tiempo de reverberación se mide a partir de una curva de decaimiento energético, denominada ETC (*Energy Time Curve*) (fig 3.1). Esta curva se define como el tiempo en segundos necesario para que la intensidad sonora en un recinto decaiga 60 dB desde su nivel original o como lo menciona la Norma Internacional ISO 354³³, como la representación gráfica del decaimiento del nivel de presión sonora en un espacio en función del tiempo después de que la fuente sonora ha cesado. A esta medición del tiempo de reverberación se le denomina RT_{60} .

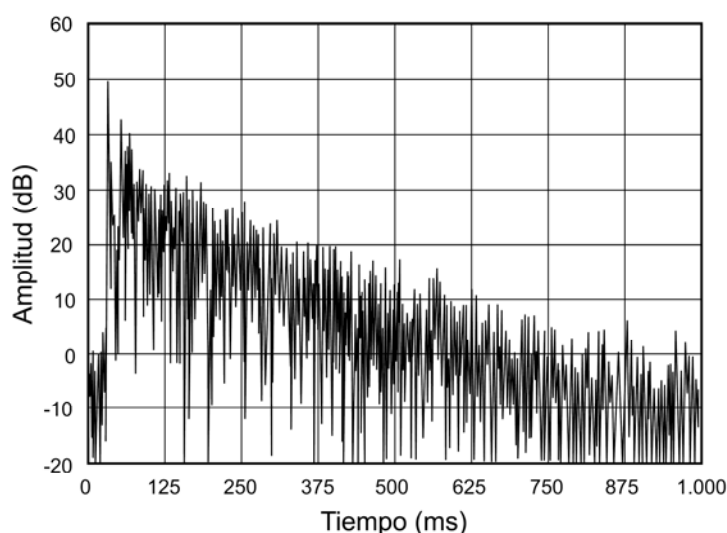


Fig. 3.1. Ejemplo de una curva ETC medida en algún punto de un recinto. (Carrión, 1998, p. 51)

Es importante mencionar que la curva ETC, muestra de alguna forma la evolución de la energía sonora dentro de un recinto.

Carrión (1998, p. 66) menciona que la curva de decaimiento se puede obtener como respuesta a la emisión de un sonido intenso y breve, como podría ser un disparo.

Debido a que el tiempo de reverberación varía con cada frecuencia, es necesario calcular tanto el RT, como las curvas de decaimiento en cada una de ellas. Normalmente se calculan en seis bandas de octava: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz y 4 000 Hz.

³³ ISO 354 "Measurement of sound absorption in a reverberation room". Norma que explica el método de medición del coeficiente de absorción sonora de los materiales en una cámara reverberante.

Un punto importante a considerar es que debido al ruido de fondo, a veces imposible de evitar, no se recomienda realizar la medición del RT hasta el decaimiento de los 60 dB, pues ésta presentaría irregularidades en su decaimiento que ocasionarían confusión. Es por ello que algunas normativas de medición, como es el caso de la Norma ISO 3382, determinan la medición en dos etapas hasta alcanzar los 60 dB (fig. 3.2) o realizar una extrapolación de resultados:

- T_{20} , el cual se define como el tiempo que tarda en caer una determinada frecuencia desde -5 a 25 db.
- T_{30} el cual se define como el tiempo que tarda en caer una determinada frecuencia desde -5 a 35 db.

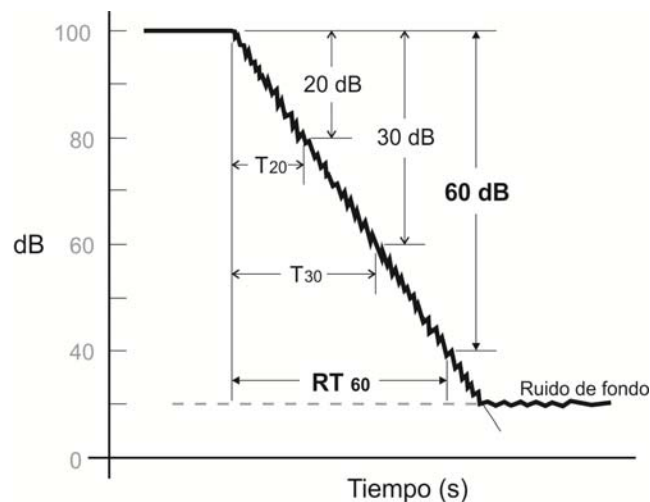


Fig. 3.2. Ejemplo de curva de decaimiento con cálculo de T_{20} y T_{30} .

3.1.2. El tiempo de reverberación, medida de la calidad acústica

Hoy en día, el tiempo de reverberación continúa siendo el parámetro clave en el estudio, diseño y acondicionamiento acústico de los espacios arquitectónicos. Es considerado como el parámetro más importante, pues describe las cualidades y la calidad acústica de los mismos.

Llinares et al. (2008), mencionan que a partir de las investigaciones teóricas de Sabine, “se crea una tradición que dura casi dos generaciones y que sintetiza toda la acústica de salas en un

parámetro, que representa las propiedades acústicas de las mismas, el tiempo de reverberación” (p. 227).

También señalan que después del surgimiento del concepto de tiempo de reverberación, muchas investigaciones se centran en el estudio y comportamiento de las propiedades absorbentes de los materiales, para así determinar el RT y valores numéricos recomendados para cada espacio de acuerdo al uso para el cual fue destinado.

Por lo general para obtener el RT de un espacio se recurre a un promedio de la resultante de T_{20} y T_{30} en las frecuencias de 500 Hz y 1 000 Hz, conocido como RT_{mid} .

El RT_{mid} de cada espacio dependerá en gran medida al uso al cual este destinado, así como del volumen del mismo. Carrión (1998, p. 64) presenta algunos márgenes de valores recomendados de RT_{mid} para diversos recintos (Tabla 3.1).

TIPO DE SALA	RT_{mid} , SALA OCUPADA (EN s)
Sala de conferencias	0,7 – 1,0
Cine	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

Tabla 3.1. Márgenes de valores recomendados de RT_{mid} en función del tipo de sala (recintos ocupados).
(Carrión, 1998, p. 64)

Dentro del campo del diseño de recintos, el tiempo de reverberación es el parámetro de mayor importancia que indica el grado de “viveza” de una sala, aunque existen otros que también están involucrados para consolidar un buen diseño y calidad acústica.

Cuando se trata del diseño de espacios para el habla, es recomendable que los valores de RT sean bajos. Esto para lograr una adecuada inteligibilidad de la palabra. Sin embargo, para espacios destinados a la música como salas de concierto, se recomienda un RT elevado.

Según Carrión (1998, p. 63), un recinto con un tiempo de reverberación alto se denomina como un espacio “vivo”, mientras que si el RT es pequeño, el espacio se considera “apagado”, “sordo” ó “amortiguado”.

Aunque el tiempo de reverberación es el parámetro fundamental para el diseño acústico de los espacios, han surgido una serie de parámetros complementarios a éste. El uso de ellos nos asegura una excelente calidad acústica del espacio a diseñar. Algunos de ellos se describen a continuación.

3.2. Otros parámetros de calidad acústica

Llinares et al. (2008, p. 228), señalan que a mediados del siglo XX surgen nuevos criterios de evaluación acústica de recintos, debidos a:

- El incremento del tamaño de los recintos y por ende el de su volumen.
- La utilización de nuevos materiales.
- La exploración de nuevas formas arquitectónicas en el diseño de recintos.
- Nuevas investigaciones de la acústica en salas.

Los parámetros acústicos, son elementos de evaluación de la calidad acústica de un espacio, desde los destinados al habla como para la música. A continuación se enlistan algunos parámetros de calidad acústica en recintos:

- **Intimidad:** también se le conoce como impresión espacial. Como su nombre lo indica, es un parámetro que hace sentir la impresión de estar rodeado e inmerso en la música. Se relaciona con las reflexiones laterales.
- **Vivacidad:** modifica la duración del sonido, reforzándolo principalmente en frecuencias medias y altas. Este parámetro está íntimamente ligado al RT.

- **Calor:** refuerza los sonidos graves y por ende se obtiene una música más cálida y con mayor fuerza.
- **Claridad:** permite la audición separada de los tonos en el tiempo de manera clara. Se relaciona con el sonido directo.
- **Difusión:** depende en gran medida de las propiedades de difusión de las superficies. Se crea un efecto donde el sonido proviene de todas direcciones y con la misma intensidad.
- **Equilibrio:** pretende percibir las sonoridades de los instrumentos de manera equilibrada.

Gimenez y Marín (1987), hacen una clasificación de algunos de los parámetros antes mencionados como se muestra a continuación:

- **Criterios energéticos:** son los que definen la transparencia del espacio. Intervienen los parámetros de **fuerza (G)**, **definición (D)** y **claridad (C)**. Ambos parámetros se relacionan con la energía temprana que llega al receptor; los primeros 50 ms para **D** y 80 ms para la **C**.
- **Criterios de temporalidad:** definen la cualidad del tiempo de reverberación. Se incluyen parámetros como **tiempo de reverberación (RT)** y **primer tiempo de decaimiento (EDT)**. El **RT** que ya se definió como el tiempo necesario para un descenso de la energía sonora en 60 dB, mientras que el **EDT** es el tiempo necesario para un decaimiento en 10 dB.
- **Criterios de espacialidad:** definen la impresión y sensación de espacio. Se incluyen los parámetros de **energía lateral (LF)** y **grado de correlación (IACC)**. Para **L**, se hace un análisis de reflexiones laterales tempranas, y así determinar la calidad acústica del recinto. Para **IACC**, se hace una relación entre las señales que llegan a cada oído.

El tiempo de reverberación sigue siendo el parámetro que de alguna forma da una idea de la calidad general de un recinto. Para la arquitectura es el parámetro acústico más significativo. Los parámetros de calidad que han surgido desde la parte final del S XX, enunciados anteriormente, son parámetros especializados que buscan que a partir de un análisis del decaimiento sonoro se deriven lecturas del comportamiento energético del sonido, sin embargo

estos parámetros no han sido todavía totalmente comprobados, por lo que la búsqueda sigue aún (Rodríguez Manzo, 2011).

LA ABSORCIÓN SONORA Y OTRAS PROPIEDADES ACÚSTICAS

4. La absorción sonora y otras propiedades acústicas

4.1. Absorción sonora

En el Capítulo 2 se explicó de manera general el proceso de absorción sonora, en este capítulo profundizaremos más en el tema.

Entre las diversas definiciones de absorción sonora, podemos encontrar que muchas de ellas coinciden en que ésta consiste en la transformación de energía sonora en energía calorífica, debido a un proceso de fricción con los materiales y el medio de propagación. Lo anterior alude a la ley de conservación de la energía, la cual establece que la energía no puede crearse ni destruirse, solo puede transformarse en otra.

Arau (1999, p. 176) explica que en el proceso de transformación de energía sonora en calorífica, participan los siguientes factores:

- Irregularidades superficiales del material.
- Efectos de difracción de la onda sonora incidente a causa de los accidentes superficiales del material.
- Efecto de conducción térmica entre el material y el aire.
- Efectos de viscosidad o pérdida de energía por fricción en el material, causado por el flujo de aire.

Según Everest y Pohlmann (2009, p. 179 y 180), una onda de sonido experimenta diversos eventos complejos durante su viaje a través de un material que modifican su energía original. Explican que cuando una onda sonora (F) viaja por el aire, en ese momento hay una pequeña pérdida de energía (A) debida a la fricción con dicho medio, la cual se hace más evidente a altas frecuencias. Cuando la onda sonora choca contra algún elemento, existe un mecanismo de reflexión (B) y una porción de energía es devuelta al medio desde la superficie del material. Sin embargo, sucede algo interesante cuando parte de la onda sonora penetra en el material, donde ocurre otra pérdida de energía (C) debida a la fricción del material con la vibración de las partículas de aire. A medida que la onda viaja, cada vez con menor energía, golpea con el límite siguiente del material y ocurre una reflexión más (D) con su pérdida de energía (E)

correspondiente, que finaliza con una refracción (G) de la onda al medio y con otra pérdida de energía (H) al contacto con el mismo, como se observa en la figura 4.1.

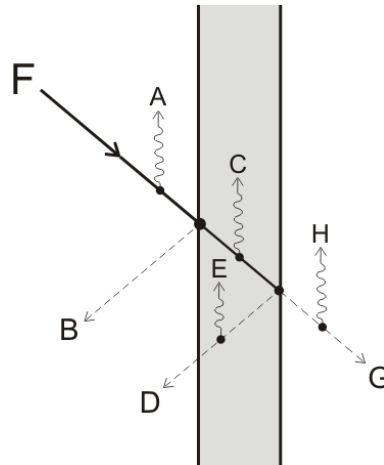


Fig. 4.1. Proceso de absorción sonora. (Adaptada de: Everest y Pohlmann, 2009, p. 180)

Así mismo, Llinares et al. (2008, p. 172) indican que la cantidad de energía absorbida depende del tipo de material, de su forma, del espesor y del método de montaje, es decir, del procedimiento de absorción que se realice, así como del ángulo de incidencia sobre el material y de la frecuencia acústica correspondiente.

4.1.1. Coeficientes de absorción sonora

Para conocer la cantidad de energía absorbida por un material, es necesario referirse a lo que se conoce como coeficiente de absorción sonora, el cual según Llinares et al. (2008, p. 172) es la razón entre la energía absorbida y la energía incidente (ecuación 4.1).

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorbida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (\text{ec.4.1})$$

Por otra parte, Everest y Pohlmann (2009, p. 180) explican que el coeficiente de absorción de un material es un promedio de todas las ondas incidentes de todos los ángulos y se expresa con el símbolo α . También mencionan que el coeficiente de absorción es una medida de la eficacia de un material para absorber el sonido. Por lo que si el porcentaje absorbido por un

material es de 55% en cierta frecuencia, se dice entonces que el coeficiente de absorción de dicho material será de 0.55 en dicha frecuencia, entendiéndose que refleja un 45% del sonido incidente. Así que, si un material absorbe el 100% del sonido, el valor será 1.0 y si refleja el 100%, será 0.0.

En relación al párrafo anterior, es importante aclarar que los materiales, sea cual sea su composición, siempre reflejan y absorben parte del sonido incidente, lo que hace pensar que ningún material puede tener un valor de 0.0 y 1.0 exactamente. Sin embargo, a veces pueden encontrarse valores superiores a 1.0, lo que se debe únicamente a su método de obtención del coeficiente de absorción (tema que se explicará más adelante) y que Carrión (1998, p. 75) y Egan (1988, p. 43) justifican como la existencia de un efecto de difracción debido al tamaño y bordes de la muestra, lo cual no significa que el material absorba más del sonido incidente, pues resulta ilógico.

Ligado a lo anterior, Carrión (1998, p. 75) menciona que una ventana abierta puede considerarse como un elemento absorbente muy efectivo, ya que ésta actúa a modo de sumidero del total de la energía incidente.

Ahora bien, como ya se mencionó, la energía absorbida varía con la frecuencia sonora, por lo que el coeficiente de absorción sonora se expresa en bandas de octava, de 125 Hz a 4 000 Hz normalmente. La tabla 4.1 muestra el ejemplo de coeficientes de absorción sonora de materiales y mobiliario comunes en la construcción, así como de personas en sus distintas frecuencias.

Coeficientes de absorción sonora						
Nombre del material	Frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Pared de ladrillo, sin pintar	0.025	0.025	0.03	0.04	0.05	0.07
Pared de ladrillo, pintada	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Bloque de concreto	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Bloque de concreto pintado	0.1	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Repellado en paredes	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.03
Yeso acabado rugoso	0.14	0.10	0.06	0.05	0.04	0.03
Yeso acabado liso	0.14	0.10	0.06	0.04	0.04	0.03
Mármol pulido	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Madera fijada sólidamente a una pared o a un elemento sólido	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02
Vidrio de 3mm (ventana)	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Pavimento cerámico	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Loseta de linóleo o vinílica sobre concreto	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02
Duela sobre concreto	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
Madera barnizada sobre vigas	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Alfombra gruesa encima de concreto	0.02	0.06	0.14	0.37	0.60	0.65
Alfombra de 3 mm sobre fieltro, encima de concreto	0.11	0.14	0.37	0.43	0.27	0.25
Cortina de algodón de 340 g/m ² de gramaje, plana a la pared	0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35
Cortina de algodón de 480 g/m ² de gramaje, plana a la pared	0.05	0.07	0.13	0.22	0.32	0.35
Cortina de algodón de 340 g/m ² de gramaje, fruncida al 150%	0.07	0.31	0.49	0.81	0.66	0.54
Cortina de algodón de 480 g/m ² de gramaje, fruncida al 150%	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
Fieltro 25 mm	0.18	0.36	0.71	0.79	0.82	0.85
Fibra de vidrio 22 kg/m ² de 30 mm	0.10	0.32	0.55	0.66	0.79	0.77
Fibra de vidrio 22 kg/m ² de 50 mm	0.19	0.43	0.77	0.82	0.94	0.83
Lana de roca 100 kg/m ² de 30 mm	0.07	0.40	0.88	0.92	0.96	1.05
Lana de roca 100 kg/m ² de 50 mm	0.19	0.74	0.95	0.98	0.96	1.04
Grava suelta y húmeda de 20 cm de grosor	0.15	0.25	0.40	0.55	0.60	0.60
Suelo áspero	0.21	0.52	0.64	0.64	0.60	0.62
Hierba 5 cm de altura	0.11	0.26	0.60	0.69	0.82	0.99
Audiencia ocupando butacas bien tapizadas	0.52	0.68	0.85	0.97	0.93	0.85
Butacas bien tapizadas	0.49	0.66	0.80	0.88	0.82	0.70
Bancos de iglesia de madera 100% ocupados	0.57	0.61	0.75	0.86	0.91	0.86
Asientos de madera 100% ocupados	0.60	0.74	0.88	0.96	0.93	0.85
Asientos de madera 75% ocupados	0.46	0.56	0.65	0.75	0.72	0.65

Tabla 4.1. Ejemplo de coeficientes de absorción sonora de algunos materiales comunes en la construcción, mobiliario y personas. (Datos tomados de: Arau (1999, p.190 - 192)

Aunado a lo anterior, Harris (1995, p. 30.5) señala que el coeficiente de absorción de los materiales varía dependiendo del tipo de montaje en como están sujetos, por lo que es importante asegurarse que los datos se refieran a las mismas condiciones de montaje.

Una vez entendido el concepto de coeficiente de absorción sonora, es necesario referirnos a otro término importante: el NRC (siglas en inglés de *Noise Reduction Coefficient*), definido como el coeficiente de reducción sonora. Este parámetro sirve para determinar el promedio del

coeficiente de absorción sonora de un material, del cual Arau (1999, p. 176) menciona que es la media de los coeficientes de absorción sonora medidos en las bandas de octava de 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz y 2 000 Hz.

Un ejemplo de lo enunciado en el párrafo anterior, puede explicarse con el caso de una alfombra gruesa sobre un piso de concreto, donde, su coeficientes de absorción sonora es de: 0.06, 0.14, 0.37 y 0.60 para las frecuencias de 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz y 2 000 Hz respectivamente. Si se realiza un promedio en estas frecuencias, el NRC será 0.29.

Hay otro parámetro semejante al NRC, el SAA (siglas en inglés de *Sound Absorption Average*) denominado como el promedio de la absorción de sonido, siendo ambos, parámetros que indican el nivel de sonido absorbido por un material y se obtienen entre valores de 0.0 a 1.0. Sin embargo, la diferencia consiste en que el SAA se promedia en 12 bandas de tercios de octava, regularmente entre 200 Hz a 2 500 Hz y el NRC en las cuatro bandas de octava antes mencionadas, convirtiéndose el SAA en un promedio basado en una mayor resolución que el NRC, aunque se obtienen valores muy semejantes entre ellos. Es importante señalar que el SAA es más difícil de obtener, ya que normalmente el coeficiente de absorción de un material se presenta en la literatura en bandas de octava y no en tercios de octava, siendo estos últimos más complicados de conseguir.

4.1.2. Materiales absorbentes

El grado de absorción de un material depende principalmente de su tipo, sin embargo, los materiales absorbentes tienen la característica de absorber el sonido incidente en mayor grado, es por ello que la correcta elección de estos materiales permite obtener el grado de absorción requerido de acuerdo al espacio analizado.

Dentro del campo de la acústica arquitectónica, puede decirse que existen materiales denominados absorbentes, como fibras de vidrio, lanas minerales, espumas de poliuretano, entre otras, las cuales además pueden recubrirse con materiales muy delgados. También podemos encontrar materiales compuestos, como paneles rígidos perforados y con material absorbente en el interior (resonadores).

Para identificar mejor los materiales absorbentes descritos anteriormente, Arau (1999, p. 178 - 179) realiza una clasificación de acuerdo a su composición física:

Grupo 1

Son aquellos materiales porosos flexibles y no flexibles, tales como yesos acústicos, concreto poroso, fibras de vidrio, lanas de roca, entre otros.

Estos materiales poseen un gran número de canales por los cuales la onda sonora penetra. Los materiales de este grupo absorben la energía sonora gracias a la densidad del aire, entendiéndose que cuando la onda sonora incide en el material, se produce una vibración del aire en el interior de los poros, generando un contacto con las paredes de los mismos, lo que ocasiona una disipación de la energía sonora. Se dice que entre mayor sea el número de canales o poros, la absorción será mayor.

Las figuras 4.2 y 4.3, muestran un ejemplo de los materiales de este grupo, así como una gráfica del coeficiente de absorción representativa de estos materiales, respectivamente.



Fig. 4.2. Materiales absorbentes como fibras de vidrio, lanas de roca y espumas de poliuretano. (<http://www.owenscorning.com/>, <http://www.itp.eu/>, <http://www.jomaro.com.ar/> y <http://www.pinta-acoustic.com/>)

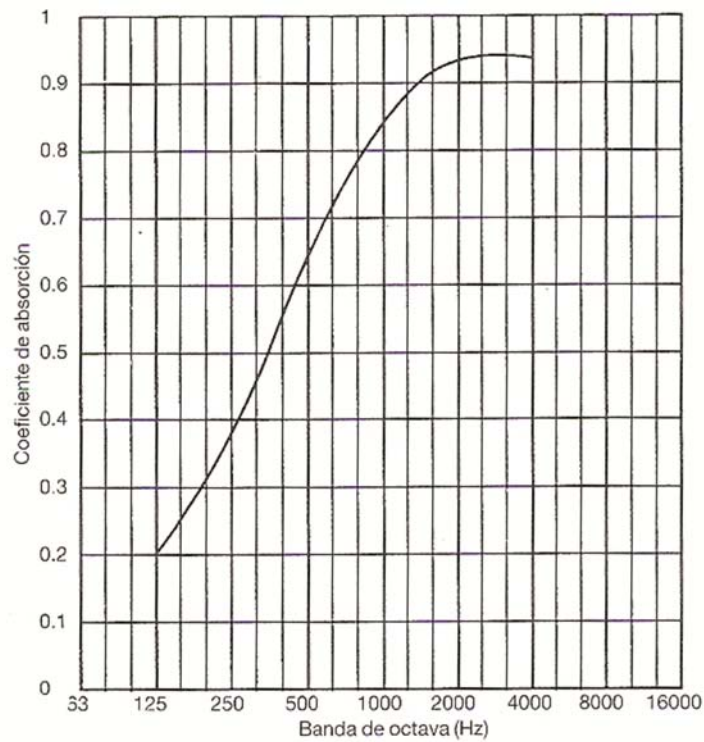


Fig. 4.3. Curva de absorción representativa del Grupo 1. (Arau, 1999, p. 178)

Grupo 2

Son materiales flexibles y porosos, recubiertos con una superficie no porosa y ligera, como el caso de una fibra de vidrio recubierta con alguna lámina de plástico por ejemplo.

Entre los recubrimientos más comunes, según Carrión (1998, p. 84) están:

- Velo acústicamente transparente.
- Superficies microporosas.
- Placas rígidas de mortero poroso a base de granos de mármol u otras piedras naturales.
- Placas de viruta de madera fina de madera aglomerada.
- Láminas de plástico, papel o cartón.
- Láminas metálicas, entre otras.

En el caso de estos materiales, el proceso de absorción sonora o disipación de la energía sonora, se debe en gran medida a la fricción interna entre el material absorbente y la superficie que lo recubre.

En las figuras 4.4 y 4.5, podemos observar un ejemplo de los materiales de este grupo y la gráfica característica del mismo.



Fig. 4.4. Materiales absorbentes con recubrimiento, tales como láminas de plástico, metálicas y membranas acústicas. (<http://www.acousticalceilingtiles.com/>, <http://www.fiberglasscolombia.com/> y <http://www.certainteed.com/>)

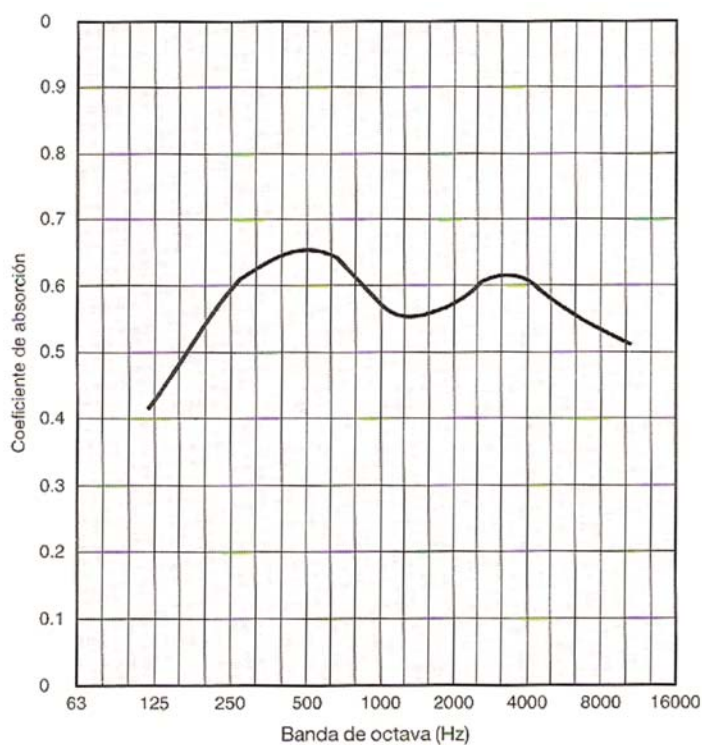


Fig. 4.5. Curva de absorción representativa del Grupo 2. (Arau, 1999, p. 178)

Grupo 3

En este grupo se encuentran los paneles ligeros montados a una cierta distancia de separación de una pared rígida, dejando una cámara de aire entre el muro y el panel. Dicha separación puede estar rellena con material absorbente poroso flexible, como los del Grupo 1. Al separar los paneles del muro, se logra una mejora en la absorción sonora.

El proceso de absorción en este grupo, se debe a la fricción interna del panel, así como a la separación y sistema de sujeción entre éste, el muro y el material absorbente (si es que se incluyó).

Puede observarse el ejemplo de los materiales que conforman este grupo en la figura 4.6, mientras que en la figura 4.7 se observa una gráfica típica del coeficiente de absorción de dichos materiales.

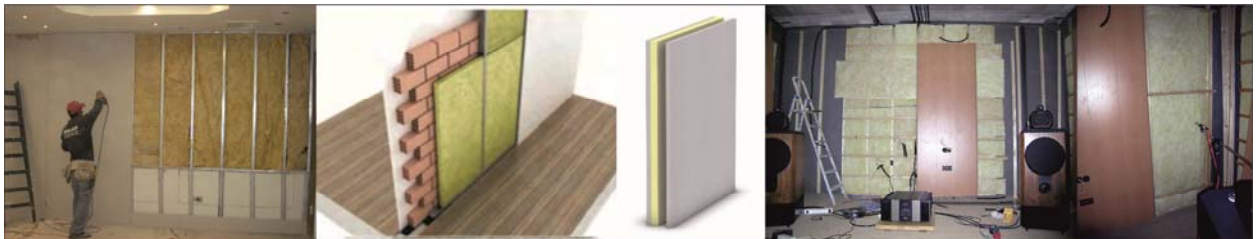


Fig. 4.6. Ejemplo de paneles montados a un muro a través de una estructura metálica o de madera, dejando una cámara de aire entre el muro y el panel. La cámara de aire puede recubrirse con material absorbente. (<http://www.drywall.com.ve/>, <http://www.rockwool.es/>, <http://www.ebawe.de/es/> y <http://www.mundohi-fi.com/>)

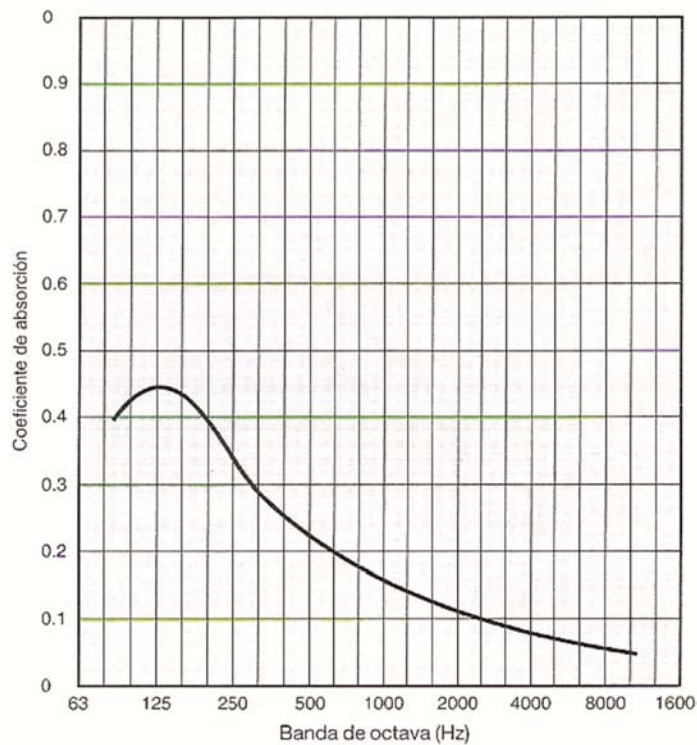


Fig. 4.7. Curva de absorción representativa del Grupo 3. (Arau, 1999, p. 179)

Grupo 4

Entre los materiales o elementos de este grupo se encuentran los paneles perforados, también llamados resonadores de Helmholtz. Son elementos que se conforman por láminas o placas perforadas no porosas formando un espacio de aire entre estas y el muro trasero. El espacio de aire puede estar relleno con un material poroso. Al incluir material absorbente, se obtiene una mejor absorción en todas las frecuencias. La figura 4.8, muestra un esquema de un resonador múltiple con perforaciones realizadas en un panel.

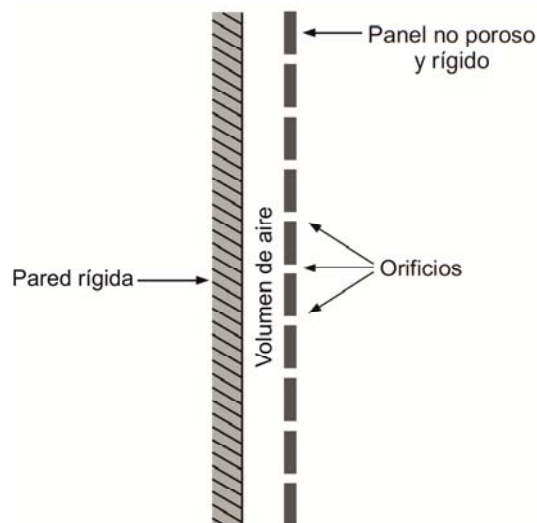


Fig. 4.8. Esquema de un resonador múltiple. (Adaptada de: Carrión, 1998, p. 96)

Los resonadores Helmholtz sirven para atenuar el sonido en un rango de frecuencias deseadas, aunque generalmente actúan mejor en bajas y medias frecuencias, esto se logra a través del diseño de las perforaciones del panel.

La disipación de la energía sonora se logra a través de la vibración que provoca la incidencia de la onda sobre el panel perforado. Dicha vibración varía según la frecuencia, lo que produce una deformación en el material, generando una pérdida de energía sonora.

Un ejemplo de este tipo de elementos se observa en la figura 4.9, y una gráfica distintiva del coeficiente de absorción de este grupo en la figura 4.10.



Fig. 4.9. Paneles y resonadores Helmholtz con perforaciones diversas con revestimiento de material absorbente. (<http://www.decustik.com/>, <http://www.flickr.com/>, <http://www.banema.pt/>)

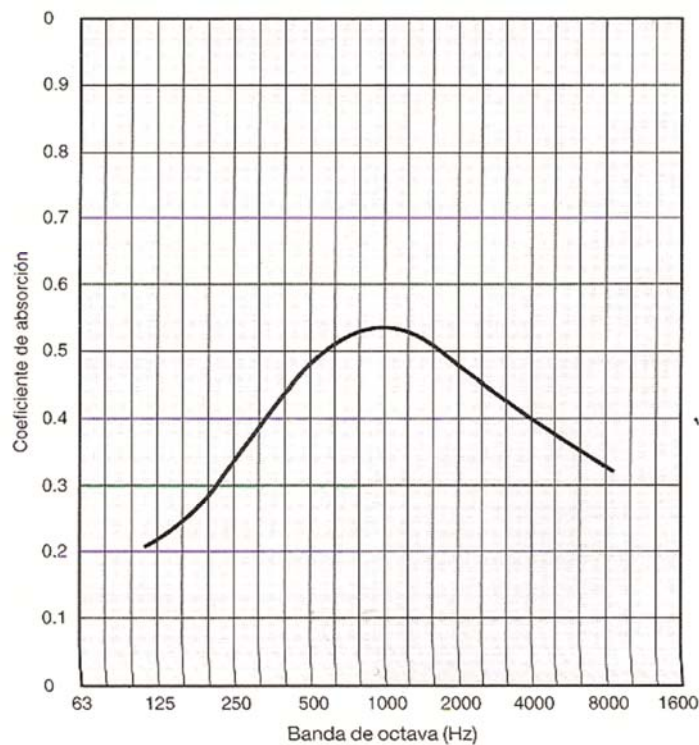


Fig. 4.10. Curva de absorción representativa del Grupo 4. (Arau, 1999, p. 179)

Una vez descritas las características en relación al proceso de absorción que sufren los materiales en cada grupo, Arau (1999), menciona que los valores del coeficiente de absorción sonora pueden variar según la frecuencia del sonido, el espesor del material, así como del método de montaje con que se sujeten cada uno de ellos. Sin embargo añade que hay otros parámetros que también ayudan a definir la absorción sonora de un material. Dichos parámetros se definen más adelante en la sección 4.2. *Otros parámetros acústicos*, de este capítulo.

Por otra parte, Pérez (1989) indica que las propiedades absorbentes de los materiales porosos dependen en gran medida del tratamiento de su superficie, por lo que no deben recubrirse con pintura pues los poros tienden a sellarse. En cambio sugiere recubrir dichos materiales con elementos adecuados, como el velo acústicamente transparente, mencionado anteriormente.

Es importante señalar que en la clasificación anterior no se consideran a las personas y el mobiliario como elementos absorbentes de un espacio, no obstante, desde el punto de vista de

la acústica de recintos, son elementos esenciales, para estudiar el comportamiento de este tipo de espacios tales como: salas de concierto, auditorios, entre otros, con audiencia y mobiliario.

4.1.3. Obtención del coeficiente de absorción sonora

Los coeficientes de absorción sonora de los materiales, pueden determinarse a partir de dos métodos principalmente: por incidencia normal o directa, correspondiente al tubo de impedancias y por incidencia aleatoria a través de una cámara reverberante.

Debido a que el desarrollo de esta investigación se basa en la utilización de un tubo de impedancias, dicho método se describirá con mayor detalle.

4.1.3.1. Tubo de impedancias (incidencia normal o directa)

El tubo de impedancias es también llamado tubo de Kundt debido a que éste fue diseñado por el físico alemán August Kundt³⁴ (1839 – 1894) (fig. 4.11). En 1866 Kundt desarrolló dicho método para el estudio del desplazamiento y velocidad de las ondas sonoras a través de un tubo. Observó que al colocar polvo de lycopodium³⁵ en el interior de un tubo y al generar una vibración en el mismo a través de golpes con un pistón, el polvo tendía a acumularse en diferentes nodos, lo que permitió a Kundt medir la distancia entre ellos. Sin embargo, el pistón generaba siempre la misma frecuencia y por lo tanto el mismo patrón de onda, es por ello que Kundt experimenta con tubos de diferente longitud, por lo que pudo observar distintos patrones de onda y medirlos nuevamente.

³⁴ Comenzó sus estudios de ciencia en Leipzig, aunque luego se trasladó a la Universidad de Berlín. Ahí decidió finalmente estudiar física, especializándose en el campo de la luz y del sonido. Fue profesor de física en diferentes universidades de Europa. En 1888 regresa a Berlín, dónde se convierte en el sucesor de Hermann von Helmholtz en la dirección del Instituto de Física de Berlín. (<http://es.wikipedia.org/>)

³⁵ Esporas provenientes de una especie vegetal de la familia de los helechos. (<http://es.wikipedia.org/>)



Fig. 4.11. August Kundt. (<http://es.wikipedia.org/>)

Este método tiene la particularidad de que la frecuencia es inversamente proporcional al diámetro interno del tubo, por lo que si se requiere una frecuencia alta, el tubo debe tener un diámetro interno pequeño y viceversa (Álvarez et al. 2010).

El tubo de impedancias, debe contemplar un tubo, una muestra de material (generalmente absorbente) en un extremo del tubo y una fuente sonora o de excitación al otro lado. También debe contener espacios para micrófonos, montados de manera alineada al eje del tubo (fig. 4.12)

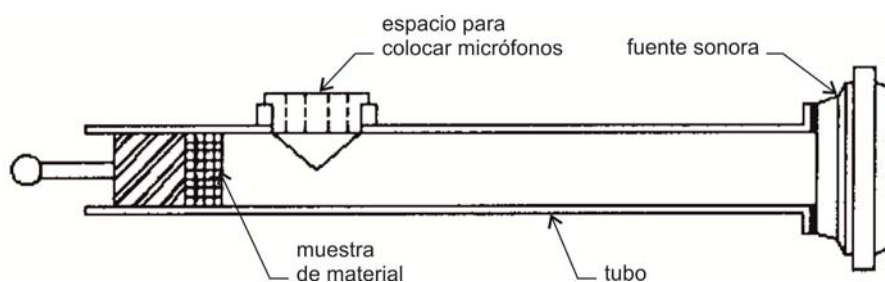


Fig. 4.12. Esquema tubo de impedancias. (Adaptada de: Norma ASTM E1050 – 98, p. 6)

Castañeda y González (2004) y Gozález et al. (2005), explican el fenómeno dentro del tubo de impedancias, como la fracción de energía absorbida de la potencia acústica que incide perpendicularmente sobre la superficie de un material. Dicho fenómeno ocurre por la

generación de una onda plana³⁶, la cual se mueve en sentido longitudinal al tubo de impedancias y que al llegar a la muestra parte de ella se absorberá y otra se reflejará, produciendo una onda estacionaria con una disminución de la intensidad. Esto provocará diferentes amplitudes de onda; una debida a la onda incidente y otra a la reflejada. Estas amplitudes son recibidas por los micrófonos, los cuales enviarán dicha información a un analizador para su estudio. La figura 4.13 ejemplifica la creación de distintas amplitudes dentro del tubo. A la amplitud de máxima presión se le conoce como antinodo y la de mínima presión, nodo.

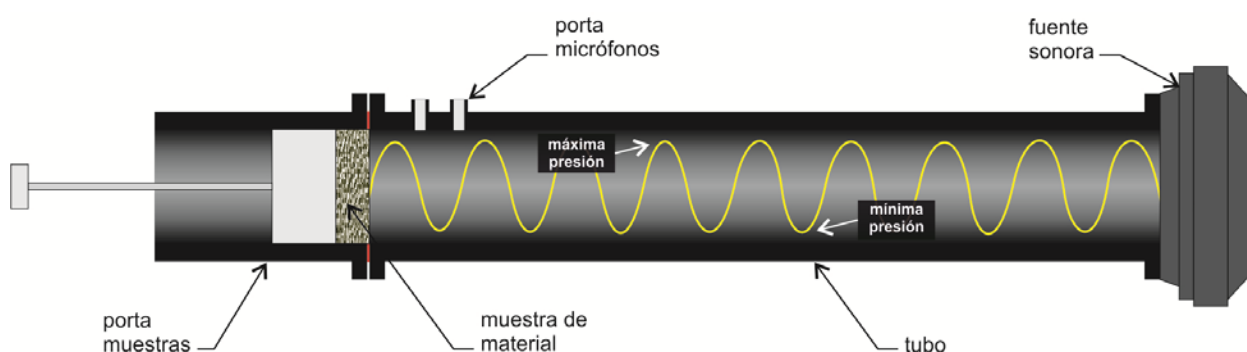


Fig. 4.13. Representación de la máxima y mínima presión o amplitudes dentro de un tubo de impedancias.

En relación a lo anterior, Juliá (2008) menciona que el cálculo del coeficiente de absorción sonora a través de un tubo de impedancias, no es más que el cálculo del cociente entre la energía sonora absorbida por la superficie de la muestra de ensayo (sin retorno) y la energía acústica incidente de la onda plana con incidencia normal.

Hoy en día, el tubo de impedancias tiene distintas aplicaciones, entre ellas se encuentran la determinación de propiedades acústicas de los materiales, como el coeficiente de absorción sonora, la impedancia acústica, resistencia al flujo (parámetros que se definirán más adelante), entre otros.

Los primeros trabajos en relación a la obtención de los parámetros antes mencionados y basados en el principio del tubo de Kundt, se remontan a 1942 aproximadamente, con Leo

³⁶ Debido a la incidencia de este tipo de onda sobre el material, el método del tubo de impedancias es un método de incidencia directa o normal, ya que no sufre ninguna alteración antes de llegar a la muestra.

Leroy Beranek³⁷. Beranek (1942) menciona que el interés de entender las propiedades acústicas de materiales porosos es cada vez más importante, debido a la amplia variedad de aplicaciones que se continúan encontrando para estos materiales. También señala que el problema de la absorción en materiales acústicos ha sido estudiado por varios escritores, quienes relacionaron a la impedancia acústica y al coeficiente de absorción de los materiales con materiales porosos bajo ciertas condiciones de montaje e incidencia de la onda.

A partir de estas premisas, Beranek y otros investigadores comienzan a desarrollar teorías, modelos matemáticos y experimentos para determinar y relacionar algunos parámetros y propiedades acústicas de los materiales porosos y fibrosos y con ello surgen infinidad de investigaciones basadas en el tubo de Kundt y otros métodos.

Es importante mencionar que los primeros aparatos diseñados para determinar las propiedades acústicas de materiales porosos, han sufrido modificaciones. Sin embargo hasta la fecha todos coinciden en la utilización de un tubo, una fuente sonora para generar el sonido y micrófonos para captar la señal. La figura 4.14 muestra los esquemas de dichos aparatos de medición a través del tiempo.

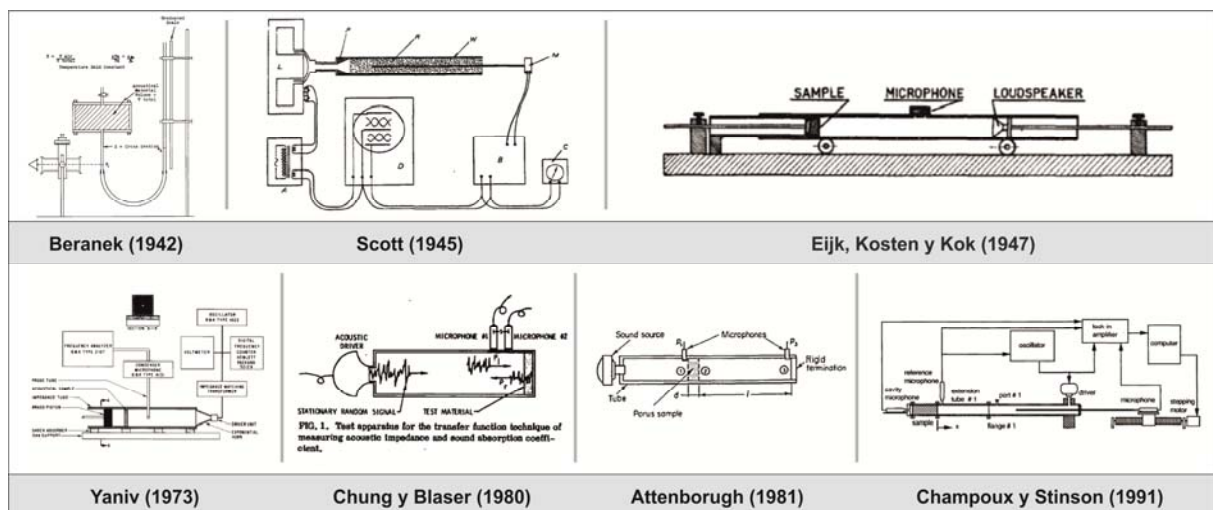


Fig. 4.14. Aparatos para medir propiedades acústicas de materiales porosos, basados en el tubo de Kundt.

³⁷ Ingeniero estadounidense, experto en acústica. Durante la segunda guerra mundial, se hizo cargo del Laboratorio de Electroacústica de la Universidad de Harvard, donde diseñó la primera cámara anecoica con objeto de estudiar los efectos del ruido. En 1948 funda *Bolt, Beranek and Newman*, como una compañía en consultoría acústica. (<http://es.wikipedia.org/>)

Beranek (1942), propuso un aparato para medir la porosidad de los materiales. Dicho aparato consiste en introducir una muestra de material en una pequeña cámara. Posteriormente se abre una llave para liberar presión, pasando a través de la muestra y causando una diferencia de presiones, la cual se mide a partir de un manómetro. En el caso de **Scott** (1945), propuso un aparato para medir la constante de propagación³⁸. El aparato consistía en medir la caída de presión sonora en el interior de una muestra, pasando un micrófono a través de la misma. Dicho aparato se rellenaba de lana de roca, se producía una señal a partir de una fuente sonora, y se registraba la caída de intensidad (constante de atenuación) de la señal al pasar por la muestra por medio de un micrófono. Posteriormente **Eijk, Kosten y Kok** (1947), **Yaniv** (1973), **Chung y Blaser** (1980), **Attenborough** (1981), **Champuox y Stinson** (1991), entre otros, propusieron un tubo alargado con una fuente sonora en un extremo del mismo y una muestra de material en el otro, o bien al centro, para así determinar diferentes propiedades acústicas de los materiales. La señal generada al interior del tubo era percibida y recibida por micrófonos para su análisis a partir de un sistema de análisis de señal. Estas propuestas constituyen el proceso para lo que hoy conocemos como tubo de impedancias.

Actualmente, existen empresas certificadas para la manufactura de tubos de impedancias con un rango de frecuencias aceptable, por lo que su adquisición es relativamente sencilla, sin embargo los costos son elevados. Por otra parte, es posible el diseño y manufactura de un tubo de impedancias a partir de normatividad existente para tal fin y a un menor costo. Un ejemplo es el caso de la Norma ASTM E1050 – 98, la cual se refiere a la obtención de la impedancia y la absorción de materiales acústicos, a través de un método estandarizado utilizando un tubo, dos micrófonos y un sistema digital de análisis de frecuencias (norma utilizada para el desarrollo del tubo de impedancias de esta investigación, la cual se describe con mayor detalle en el Capítulo 5 de esta investigación).

Como complemento de lo anterior, entre las normas existentes para la determinación de parámetros acústicos de los materiales, tales como el coeficiente de absorción sonora a partir del método de tubo de impedancias por incidencia normal, se encuentran: ASTM C384, ASTM E2611, ASTM 1050 e ISO 10534-1.

³⁸ Según Juliá (2008), la constante de propagación describe la variación espacial de la perturbación acústica en el interior de un medio poroso.

La figura 4.15 muestra un tubo de impedancias comercial ACUPRO, diseñado por la empresa ALAVA INGENIEROS, con un rango de frecuencias de 50 Hz a 5 700 Hz. Dicho tubo contempla un software para su uso, con el que pueden obtenerse propiedades acústicas, tales como el coeficiente de absorción sonora de un material, impedancia, entre otros.



Fig. 4.15. Tubo de impedancias comercial de la marca Acupro. (<http://www.alava-ing.es/>)

La ventaja que el tubo de impedancias provee, es que éste utiliza pequeñas muestras (generalmente de 2" a 3") para la determinación de las propiedades acústicas de los materiales, tales como el coeficiente de absorción sonora. Debido al tamaño de las muestras, este método se aplica solamente a materiales porosos, por lo que no puede emplearse para la determinación del coeficiente de absorción de otros, donde su tamaño es importante para la determinación de la absorción, un ejemplo de ello son los resonadores (Arau, 1999, p 189). O bien, tampoco puede emplearse en materiales donde el montaje sea importante, ya que este no puede simularse en dicho método.

Por otra parte, es un método que requiere poco espacio para su manipulación, lo que le brinda la cualidad de poder ser transportado de un sitio a otro con facilidad. Además de que no necesita un campo demasiado controlado como el de una cámara reverberante para su uso.

4.1.3.2. Cámara reverberante (incidencia aleatoria)

El método de cámara reverberante o de incidencia aleatoria, es el método más conocido para la determinación del coeficiente de absorción sonora de los materiales, aunque también pueden determinarse otros parámetros acústicos. Este método se basa en datos del decaimiento

sonoro o bien del tiempo de reverberación para obtener el coeficiente de absorción sonora de un material, por lo que está directamente relacionado con Sabine.

Olynyk y Northwood (1965), señalan que el principio de la cámara reverberante se basa en que el campo debe ser totalmente difuso, por lo que deben existir ondas sonoras reflejándose e incidiendo por diversos ángulos de manera aleatoria.

Según lo anterior, la cámara reverberante debe ser un espacio diseñado especialmente para la creación de un campo sonoro difuso en su interior, y para lograrlo, las superficies internas de la misma (piso, muros y techo) deben ser duras y muy reflejantes. Por su parte, Everest y Pohlmann (2009, p.182), señalan que entre más largo sea el tiempo de reverberación de una cámara, más precisas serán las mediciones.

Pérez (1989) indica que los valores del tiempo de reverberación de una cámara reverberante vacía pueden ser iguales o superiores a (tabla 4.2):

Tiempo de reverberación en una cámara reverberante						
Hz	125	250	500	1 000	2 000	4 000
RT (s)	5.0	5.0	5.0	4.5	3.5	2.0

Tabla 4.2. Tiempo de reverberación en una cámara reverberante. (Adaptada de: Pérez, 1989)

El volumen de una cámara reverberante según la normatividad existente, debe ser de por lo menos 150 m³, aunque se recomienda que sea de 200 m³. Una cámara reverberante que exceda los 500 m³, dificulta la obtención del coeficiente de absorción sonora en frecuencias altas, debido a la absorción que ejerce el aire en un espacio de tales dimensiones.

Las figuras 4.16 y 4.17, muestran el ejemplo de una cámara reverberante, la cual pertenece al laboratorio de acústica a la Universidad de Salford en Inglaterra. Los muros, piso y techo son altamente reflejantes, además de contener elementos colgantes movibles (altamente reflejantes también), los cuales intensifican la reflexión del sonido dentro del espacio. Las dimensiones de dicha cámara son 7.0 m de ancho x 7.62 m de largo y 4.57 m de alto.



Fig. 4.16 y 4.17. Cámara reverberante de la Universidad de Salford. (<http://www.flickr.com/>)

Para la determinación del coeficiente de absorción sonora de un material en una cámara reverberante de 200 m^3 , la normatividad específica que debe introducirse una muestra de material con un área comprendida entre 10 m^2 a 12 m^2 . La forma de la muestra se sugiere que sea rectangular con una relación de anchura y longitud entre 0.7 y 1. La normativa (ISO 354), señala que la muestra debe colocarse de tal forma en que ninguna parte de ella este a menos de 0.75 m de distancia de algún borde o arista de la cámara. Por otra parte, los bordes de la muestra deberán colocarse de manera no paralela a los de la cámara, aunque si se requiere medir una muestra pesada, ésta puede montarse de manera vertical a lo largo de las paredes de la cámara, y directamente apoyada sobre el suelo, donde en este caso, según la norma mencionada, la distancia mínima de 0.75 m no precisa ser respetada.

Según la normatividad, los bordes perimetrales de la muestra deben sellarse o cubrirse con un material reflejante no superior a 1 cm de espesor. También señala que si los bordes son visibles cuando el material se coloca de manera normal en la vida real, éstos deben dejarse así y no sellarse ni cubrirse, por lo que al área de los bordes también debe incluirse en el cálculo para la determinación del coeficiente de absorción.

En las figuras 4.18 y 4.19, se observa la colocación de dos distintas muestras para su medición; la primera corresponde a una muestra de pasto, y la segunda a un acomodo de butacas. La cámara reverberante pertenece a Müller-BBM, empresa alemana consultora en ingeniería y acústica.



Fig. 4.18 y 4.19. Acomodo de muestras para su medición por parte de Müller-BBM.
(<http://www.muellerbbm.com/>)

El procedimiento de medición en una cámara reverberante, consiste en medir el tiempo de reverberación de la cámara vacía y posteriormente con la muestra de material dentro de ella (la diferencia entre RT's, permite determinar las propiedades absorbentes del material). Una vez medidos los tiempos de reverberación, se puede obtener el área de absorción equivalente de la cámara reverberante vacía (**A1**) y el área de absorción equivalente de la cámara reverberante con el material adentro (**A2**), a partir de las ecuaciones de Sabine (ecuación 4.2 y 4.3).

$$A1 = \frac{55.3 V}{cT1} - 4 Vm1 \quad (\text{ec. 4.2})$$

$$A2 = \frac{55.3 V}{cT2} - 4 Vm2 \quad (\text{ec. 4.3})$$

donde, **V** es el volumen de la cámara reverberante vacía en metros cúbicos, **c** es la velocidad de la propagación del sonido en el aire en metros por segundo, **T1** es el tiempo de reverberación de la cámara reverberante vacía expresado en segundos, **T2** es el tiempo de reverberación de la cámara reverberante con la muestra de material expresado en segundos, **m1** y **m2** son el coeficiente de atenuación de la energía³⁹.

De lo anterior, puede decirse que el método de cámara reverberante requiere un conocimiento de la relación entre el tiempo de reverberación de la misma y el total de absorción de sonido de las superficies del espacio.

³⁹ Coeficiente de atenuación de energía se refiere a la disminución de la intensidad de la energía sonora.

Como parte del procedimiento, se sugiere medir en un rango de frecuencias suficientemente amplio, en tercios de octava: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1 000, 1 250, 1 600, 2 000, 2 500, 3 150, 4 000 y 5 000 Hertz; sin embargo, se ha mencionado que los datos encontrados en la literatura son en bandas de octava: 125, 250, 500, 1 000, 2 000 y 4 000 Hz.

El tipo de señal que se aconseja emitir dentro de la cámara reverberante es ruido blanco⁴⁰ filtrado a partir de bocinas. Para el registro de la señal, se recomienda utilizar uno o varios micrófonos, lo menos dirigidos que sea posible hacia las fuentes, así como un amplificador y un sistema de registro y análisis de señal.

Por último, el coeficiente de absorción de la muestra se obtiene dividiendo el área de absorción de la muestra (restando **A1** menos **A2**) entre el área de la muestra en metros cuadrados (ecuación 4.4).

$$\alpha = \frac{AT}{S} \quad (\text{ec. 4.4})$$

donde, **AT** es el área de absorción de la muestra (restando **A1** menos **A2**) en metros cuadrados y **S** es el área de la muestra en metros cuadrados.

La normatividad señala que si una muestra comprende varios objetos idénticos, el área de absorción debe ser dividida por el número de objetos.

Es importante mencionar que los coeficientes de absorción obtenidos mediante una cámara reverberante, no son tan precisos como los obtenidos mediante el método de tubo de impedancias. Como se señaló en un principio, esto se debe a que el método de cámara reverberante llega a proporcionar resultados superiores a 1, debido a efectos de difracción provocados por el tamaño de la muestra y bordes de la misma. En relación a esto, el coeficiente de absorción de la mayoría de los materiales existentes en el campo de la acústica arquitectónica se obtienen por el método de cámara reverberante, por lo que algunos

⁴⁰ Señal de ruido aleatorio.

fabricantes publican los valores tal cual, mientras que otros los ajustan a 0.99, cuando el valor es superior a 1.

Es importante señalar, que la ventaja principal del método de cámara reverberante, consiste en que éste es el único método en considerar el sistema y condiciones de montaje de los materiales, factor esencial que afecta las propiedades de absorción de los mismos.

Entre las desventajas de este método, Castañeda y González (2004) señalan que el método de cámara reverberante es más costoso, requiere calibración precisa de los sensores y de un especial diseño de la cámara. Por otra parte, resulta importante mencionar que requiere de un espacio relativamente grande, así como de muestras de grandes dimensiones para su uso, lo que puede resultar impráctico.

La normatividad existente para la determinación de la absorción sonora a partir del método de cámara reverberante o de incidencia aleatoria, se encuentran: ISO 354, ASTM C423, DIN 52212, BS 3638 y JIS A 1409

4.1.3.3. Cámara reverberante en miniatura

El método de cámara reverberante en miniatura surge como una alternativa de solución al método de cámara reverberante y al del tubo de impedancias, el cual es un método aún no normalizado. Sin embargo se ha utilizado en diversas investigaciones, por mencionar algunos ejemplos; la BBC *Research Department* (1971) publicó un artículo donde proponían la realización de una cámara reverberante en miniatura escala 1:8. La tabla 4.3, muestra los requerimientos para la realización de dicha cámara. En la tabla se observa que las dimensiones del espacio se redujeron un factor de 8, mientras que la frecuencia aumentó un factor de 8.

**Requerimientos para una cámara reverberante a escala
1:1 y 1:8**

Requerimiento	Escala 1:1		Escala 1:8	
Volumen recomendado	200 m ³		0.39 m ³	
Volumen mínimo	180 m ³		0.35 m ³	
Área de la muestra absorbente	10 m ²		0.156 m ²	
Tiempo de reverberación mínimo en las frecuencias indicadas	RT (s)	f(Hz)	RT (s)	f(kHz)
	5.0	125	0.625	1
	5.0	250	0.625	2
	5.0	500	0.625	4
	4.5	1000	0.563	8
	3.5	2000	0.437	16
	2.0	4000	0.250	32

Tabla 4.3. Requerimientos para la realización de una cámara reverberante en miniatura escala 1:8.

(Adaptada de: Spring et al., BBC, 1971)

Otro ejemplo es el caso de la cámara reverberante en miniatura mostrada en la publicación de Silva, Godinho y Pereira (2008) del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Coimbra en Portugal. La cámara tiene forma de paralelepípedo, con un volumen de 2.73 m³ y dimensiones de 1.4 m de largo x 1.3 de ancho y 1.5 m de altura, con una puerta lateral de 0.5 m x 0.5 m. El material utilizado para su construcción fue concreto armado. Las paredes laterales y el piso, tienen un espesor de 0.1 m y la losa un espesor de 0.06 m. Cabe mencionar que la cámara está aislada con aglomerados de corcho para evitar la interferencia del ruido externo (fig. 4.20).



Figura 4.20. Ejemplo de una cámara reverberante en miniatura. (Silva et al. 2008)

4.2. Otros parámetros acústicos

Arau (1999, p. 180) señala que hay otros parámetros a parte del coeficiente de absorción sonora, que también ayudan a describir la capacidad de absorción sonora de un material absorbente.

Se mencionó que con el tubo de impedancias pueden obtenerse algunos parámetros acústicos de materiales absorbentes, sin embargo, es importante señalar que algunos de ellos se obtienen produciendo alguna modificación en la colocación del material, por ejemplo, para determinar la resistencia al flujo, la muestra de material debe colocarse al centro del tubo, con un micrófono antes y otro después de la misma. La figura 4.21 ejemplifica dicha configuración.

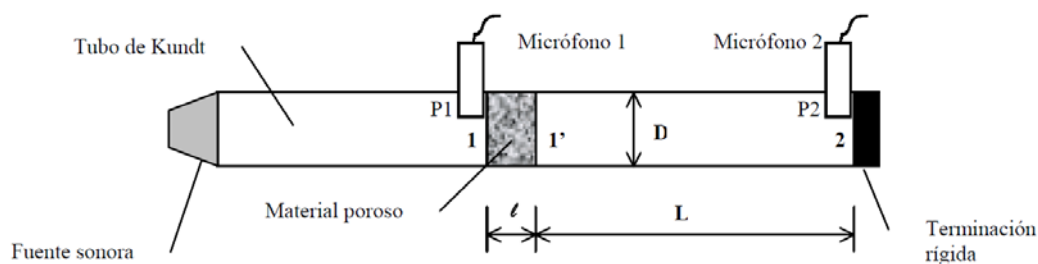


Fig. 4.21. Esquema del montaje para la obtención de la resistencia al flujo. (Juliá et al. 2006)

Juliá et al. (2008) se refieren a los parámetros acústicos como elementos que permiten caracterizar el comportamiento acústico de un material absorbente. Entre los parámetros acústicos más importantes están: resistencia al flujo, porosidad y tortuosidad.

Seguido del párrafo anterior, Juliá et al. (2008) y otros autores, tales como González, Cesteros y Cordero (2006) y Alba, Marant, Aguilera y Ramis (2006) entre otros, los definen como:

- **Resistencia al flujo:** se define como la relación entre la diferencia de presión sonora entre dos puntos y la velocidad. En otras palabras, es la resistencia que opone un material al flujo de aire cuando éste pasa a través de su estructura, sean poros o fibras. Es un parámetro que se asocia a la fricción entre el aire y la estructura del material, así como a su capacidad de absorción. Dicha resistencia se presenta a modo de distintas presiones, las cuales se miden con dos micrófonos.

Es importante señalar que a la resistencia al flujo surge a partir del término conocido como impedancia acústica, el cual es la relación entre la presión sonora y la velocidad de la onda en el medio.

Arau (1999, p. 181) menciona que la resistencia al flujo depende de: el tamaño y forma de las fibras o poros de un material; de la cantidad de éstos en un volumen dado; la forma en cómo estén orientados, espesor y densidad del material.

González, García, Morcillo y Hernández (2008), explican que la resistencia al flujo influye en el nivel de absorción sonora, ya que al tener valores pequeños de resistividad, la absorción es mayor y viceversa. Sin embargo este concepto también se asocia con el siguiente, la porosidad. Cuando se tiene un porcentaje bajo de huecos o espacios vacíos dentro del material, la resistencia es alta, mientras que al aumentar el porcentaje de dichos espacios, la resistencia decrece.

- **Porosidad:** se define como la fracción de volumen de aire o espacio vacío que contiene un material en su interior, con respecto al volumen total de éste.

La porosidad está relacionada con el porcentaje de huecos dentro de un material, cuanto mayor es el porcentaje de huecos, la porosidad es mayor. Esto también indica que a mayor porosidad, el nivel de absorción sonora será mayor.

Los materiales conocidos como absorbentes, son materiales altamente porosos, tales como espumas, fibras de vidrio, lanas minerales, entre otros, contando con un nivel de porosidad por arriba de 0.9.

- **Tortuosidad:** este término se relaciona con la porosidad de un material. Puede definirse como la determinación de la forma y la distribución de los poros en un material, especificando el grado de complejidad de la interconexión entre los poros para la propagación de la onda sonora a través del material.

González et al. (2008), mencionan que la tortuosidad influye en la absorción sonora de un material, reduciéndose la frecuencia y la absorción sonora cuanto mayor es el valor de la tortuosidad. También señalan que la tortuosidad es menor cuanto mayor es el porcentaje de huecos en el material.

Según Pfretzschner et al. (1997), los parámetros antes definidos, son interdependientes al igual que su efecto sobre la absorción sonora.

4.3. El papel de la absorción sonora en la acústica arquitectónica

En el Capítulo 2 de esta investigación, se mencionó que la utilización de la absorción dentro del campo de la acústica arquitectónica contribuye al mejoramiento y control de los algunos fenómenos acústicos producidos dentro de los espacios, tales como: la reverberación, ecos y resonancias.

En relación a lo anterior, Carrión (1998, p. 75 y 76) señala que los materiales absorbentes se utilizan habitualmente para lograr los siguientes objetivos:

- Obtención del tiempo de reverberación más adecuado de acuerdo al uso que se haya asignado a cada espacio.
- Prevención de ecos.
- Reducción del nivel de campo reverberante, tales como en restaurantes, fábricas, entre otros.

Dentro de los espacios arquitectónicos el fenómeno de reverberación es el más común en presentarse, por lo que es frecuente controlar este fenómeno para obtener el tiempo de reverberación más adecuado de acuerdo al uso del espacio.

Un ejemplo de lo antes mencionado ocurre en las aulas, donde el objetivo principal es controlar el tiempo de reverberación del espacio para lograr una adecuada inteligibilidad de la palabra o habla⁴¹, lo que en ocasiones se logra al incorporar algunos elementos absorbentes. Sin embargo, el uso de estos materiales tiene mayor influencia dentro de recintos como: teatros, auditorios, salas de concierto, entre otros, por requerir un RT muy preciso, de acuerdo al uso destinado para cada uno de ellos.

Por otra parte, Arizo et al. (2000) señala que los materiales absorbentes también son comunes en problemas de aislamiento, sin embargo, menciona que son mejores absorbentes que aislantes. Así mismo, afirma que los fabricantes de materiales absorbentes suministran más información térmica que acústica.

Por último, es importante seguir considerando a los materiales absorbentes como elementos reguladores de fenómenos producidos dentro y fuera de los espacios, ya que actualmente comienza a haber una mayor exigencia por lograr un confort acústico en los mismos.

⁴¹ Al aumentar el tiempo de reverberación en un espacio, disminuye la inteligibilidad de la palabra, lo que se perjudica la comprensión del mensaje.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

5. Planteamiento del problema y desarrollo del experimento

5.1. Introducción

En el Capítulo 1 de esta investigación, se realizó un recorrido histórico en relación a los métodos de diseño empleados para la simulación acústica de recintos. Se señaló que los modelos físicos a escala se continúan usando de manera paralela con los modelos de simulación por computadora, esto debido a las carencias de estos últimos para la exacta reproducción del comportamiento del sonido dentro de un espacio. Sin embargo, los modelos físicos a escala a pesar de contar con la virtud del uso de sonido real, éstos cuentan con una problemática en relación a la simulación de las propiedades físicas de los materiales.

La presente investigación, plantea continuar con el uso de modelos físicos a escala para predecir el comportamiento del sonido dentro de un espacio, ya sea construido o no. La intención de este experimento es encontrar una propuesta de solución para la simulación de las propiedades físicas de los materiales (en específico la absorción sonora) a diferentes escalas en relación al espacio real.

5.2. Planteamiento del problema y alcances del experimento

En relación a lo mencionado en la introducción de esta investigación, la problemática surge a partir de investigaciones previas, donde se comparó el RT entre modelos virtuales y modelos físicos a escala de algunos espacios arquitectónicos. En dichos modelos se experimentó con diversos materiales reflejantes, difusores y absorbentes. Como se ha mencionado, los resultados obtenidos entre ambos modelos (físicos y virtuales) del RT con materiales absorbentes fueron muy distintos y por lo tanto de poca confiabilidad y fidelidad.

Según lo anterior, se llegó a la conclusión de que los materiales absorbentes utilizados en escalas reales no sirven para modelos o maquetas a escala, ya que los datos obtenidos en dichos modelos, indican que el tiempo de reverberación aumenta cada que sube la frecuencia del sonido, es decir, no absorben como deberían en frecuencias altas (agudas) y resultan reflejantes ante éstas. Esto conlleva a que no puedan realizarse mediciones confiables ni predicciones acústicas del espacio a analizar.

Los principales objetivos a lograr en la experimentación son:

- Investigar y aplicar un método para la obtención del coeficiente de absorción de diversos materiales en las frecuencias de 5 kHz y 10 kHz, y así desarrollar y adquirir la instrumentación necesaria para el laboratorio.
- Indagar acerca de materiales comúnmente utilizados en modelos físicos a escala.
- Generar una base de datos de materiales utilizados en modelos a escala y materiales empleados en espacios reales, con características similares de absorción sonora.
- Aprender el procedimiento para la medición del tiempo de reverberación de un espacio a escala utilizando la instrumentación ya existente en el Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico (LADAc).
- Realizar una comparación de resultados del tiempo de reverberación obtenido en el modelo a escala y el obtenido mediante la utilización del *software CATT-Acoustics V8*.

5.3. Desarrollo del experimento

Para su realización el experimento se dividió en 4 etapas:

1. **Obtención de coeficientes de absorción sonora mediante el método de tubo de impedancias** – Aplicación de la Norma ASTM E1050 – 98, que se refiere a la obtención de la impedancia y la absorción de materiales acústicos, a través de un método estandarizado utilizando un tubo, dos micrófonos y un sistema digital de análisis de frecuencias.
2. **Comprobación de la absorción sonora de algunos materiales realizando un experimento en un caso de estudio, utilizando un modelo físico a escala** – Aplicación de materiales al modelo a escala de un espacio dado para comprobar

mediante la medición del tiempo de reverberación, los coeficientes de absorción, obtenidos mediante el método del tubo de impedancias.

3. **Comprobación de la absorción sonora de algunos materiales realizando un experimento en un caso de estudio, utilizando un modelo de simulación por computadora** – Simulación del tiempo de reverberación del espacio real con la utilización del *software CATT-Acoustics V8*, integrando los coeficientes de absorción sonora de los materiales seleccionados en la etapa anterior, obtenidos en tubo de impedancias.

El esquema de la figura 5.1, muestra la metodología empleada para el desarrollo del experimento.

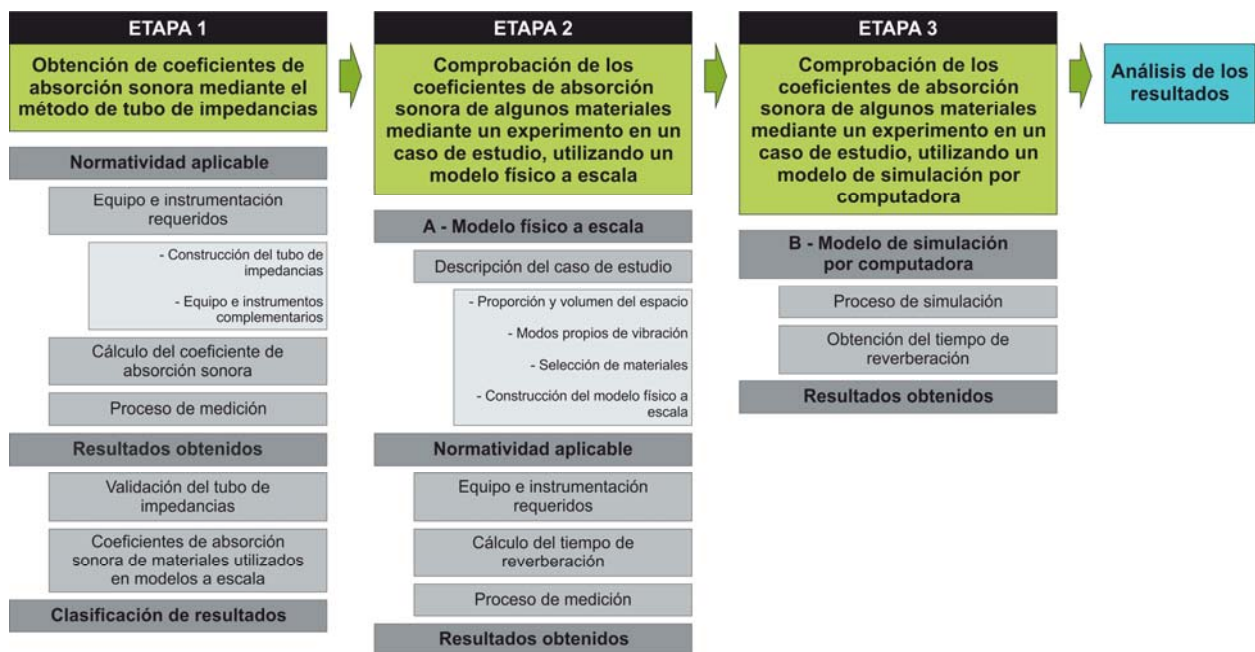


Fig. 5.1. Metodología empleada para el desarrollo del experimento.

A continuación se describen las etapas con detalle:

5.3.1. Etapa 1 – Obtención de coeficientes de absorción sonora mediante el método de tubo de impedancias

En el Capítulo 4, se describen los dos métodos principales para la obtención del coeficiente de absorción sonora de los materiales; el primero utiliza una cámara reverberante y el segundo utiliza un tubo de impedancias. Debido a las características, ventajas y desventajas de ambos métodos, enunciadas en el capítulo mencionado, el más adecuado para la obtención de coeficientes de absorción de materiales comúnmente utilizados en modelos físicos a escala es el tubo de impedancias, que es el que se aplicará en este experimento, ya que la mayoría de los materiales son ligeros como en el caso de papeles, cartones, espumas, entre otros y no pesados como lo son el tabique y el concreto, que por lo mismo tendrían que medirse en un espacio mucho mayor.

5.3.1.1. Normatividad aplicable

La norma aplicable en esta etapa del experimento es la **ASTM E1050 – 98** “*Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System*”, la cual según la *American Society for Testing and Materials*⁴² (ASTM International), es un método que emplea un tubo de impedancias, dos micrófonos y un sistema digital de análisis de frecuencias para la determinación del coeficiente de absorción en incidencia normal y la impedancia acústica normal específica en relación a los materiales.

Según la norma, este es un método destinado a proporcionar una técnica de medición mucho más rápida que el método empleado en la ASTM C384 “*Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method*”, el cual emplea una única frecuencia por medición y por lo tanto, demanda más tiempo para realizar una serie de mediciones en varias frecuencias.

El método de la norma se basa en la generación de ondas planas en el interior de un tubo, mediante el uso de una señal de banda ancha, a partir de una fuente de ruido. El patrón de

⁴² La ASTM International es reconocida a nivel mundial en el desarrollo de normas internacionales. Hasta el día de hoy, alrededor de 12, 000 normas se utilizan en todo el mundo.

onda plana se convierte en una onda estacionaria debido a la descomposición de la onda en: incidente y reflejada, dicha descomposición es ocasionada por el material a medir. El desfase de presiones de las ondas es medido de manera simultánea por dos micrófonos localizados a un costado de la pared del tubo. El cálculo del coeficiente de absorción en incidencia normal de un material acústico se realiza mediante el procesamiento de un conjunto de datos complejos a partir de una función de transferencia⁴³.

Se define que el rango de frecuencias a usar depende del diámetro del tubo, así como de la distancia entre las posiciones de los micrófonos. Por otra parte, menciona que si se necesita un rango de frecuencias extendida, se puede obtener mediante el uso de tubos con diferentes diámetros y variabilidad entre las separaciones de los micrófonos.

La norma especifica las características físicas y de diseño que deberá contemplar el tubo, también describe las características de la fuente sonora y micrófonos, así mismo sugiere equipo e instrumentos adicionales para el proceso de medición, y por último desarrolla las fórmulas para la determinación del coeficiente de absorción y de impedancia acústica. Estos puntos se desarrollan con mayor profundidad en la siguiente sección.

Así mismo menciona que el método puede ser aplicado para la obtención de coeficientes de absorción sonora de materiales absorbentes en incidencia normal y los datos obtenidos pueden ser de gran utilidad para la investigación de materiales absorbentes del sonido.

Por otra parte, señala que este método permite la obtención de coeficientes de absorción cuando no sea factible la adquisición de muestras de gran tamaño y su determinación por el método de incidencia aleatoria en una cámara reverberante.

Por último explica que las mediciones descritas en este método pueden ser de gran precisión, sin embargo éstas pueden ser erróneas, debido a la incidencia de otras fuentes en la medición, o a la irregularidad del material, ya sea físicamente o al momento de su montaje.

⁴³ Una función de transferencia es un modelo matemático a partir de un conjunto de ecuaciones. (<http://www.itescam.edu.mx/>)

5.3.1.1.1. Equipo e instrumentación requeridos

En la norma se especifica y sugiere el equipo e instrumentación necesarios para realizar la medición. También se describe el proceso de medición y las fórmulas aplicables para la obtención de los parámetros antes mencionados.

Debido a los requerimientos en la obtención de datos, fue necesaria la construcción de un tubo de impedancias y la adquisición de equipo e instrumentos adicionales, los cuales se describen más adelante.

Según la norma, el aparato a construir, debe ser un tubo, con una muestra de material en un extremo y una fuente sonora al otro. Debe contener espacios para micrófonos, los cuales deben estar montados de manera alineada en dos posiciones sobre la pared del tubo (fig. 5.2). También menciona que debe ser utilizado un sistema digital de análisis de frecuencias de dos canales para la adquisición y procesamiento de datos.

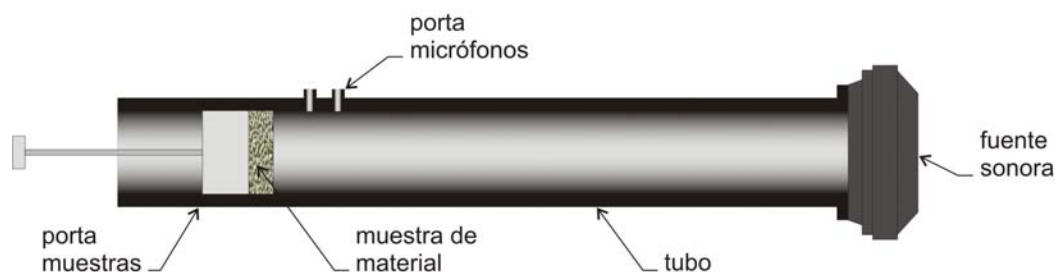


Fig. 5.2. Componentes del tubo de impedancias.

5.3.1.1.1.1. Construcción del tubo de impedancias

Para el diseño y manufactura del tubo de impedancias, se recurrió al apoyo de alumnos de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica de UPIITA (Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas) del IPN (Instituto Politécnico Nacional), con quienes, mediante un convenio académico con CyAD-UAM-Azcapotzalco, se realizó dicho instrumento, donde a ellos les permitió desarrollarlo como tesis de licenciatura, con el apoyo en la utilización de las instalaciones y la instrumentación del LADAc, así como el apoyo económico para la compra de materiales y equipo adicional necesario.

En cuanto al diseño del tubo de impedancias, la Norma ASTM E1050 – 98, especifica lo siguiente:

Tubo:

- **Sección** – El interior del tubo puede ser circular o rectangular, con una sección constante en todo su largo; debe estar recto y la superficie interna del mismo, lisa, sin ninguna costura, ni poros y libre de polvo. Se aconseja que las paredes del tubo sean macizas⁴⁴ para evitar vibraciones y se recomienda un espesor de al menos el 5% del diámetro interno (fig. 5.3).



Fig. 5.3. Sección recomendable del tubo: (a) circular y (b) rectangular.

- **Rango de frecuencias de análisis** – El rango de frecuencias depende de lo siguiente: el límite de la frecuencia baja depende del espaciamiento entre los micrófonos (se recomienda que el espacio entre micrófonos exceda el 1% de la longitud de onda correspondiente al límite de la frecuencia baja de interés) y a la exactitud del sistema de análisis y el límite de la frecuencia alta depende del diámetro interno del tubo y de la velocidad del sonido.
- **Diámetro** – En relación al diámetro interno del tubo, se establece una ecuación para su determinación, a fin de mantener la propagación de la onda plana. Dicha ecuación considera el límite superior de la frecuencia, así como la velocidad del sonido dentro del tubo.
- **Largo** – El tubo debe ser lo suficientemente largo para la generación de ondas planas antes de ser detectadas por los micrófonos. Se debe permitir una distancia mínima de

⁴⁴ La norma sugiere la fabricación del tubo con materiales como: metal, plástico, cemento y madera. Es necesario que estén recubiertos con un acabado liso a fin de mantener una baja atenuación del sonido para ondas planas.

tres veces el diámetro interno del tubo entre la fuente sonora y el micrófono más cercano (fig. 5.4).

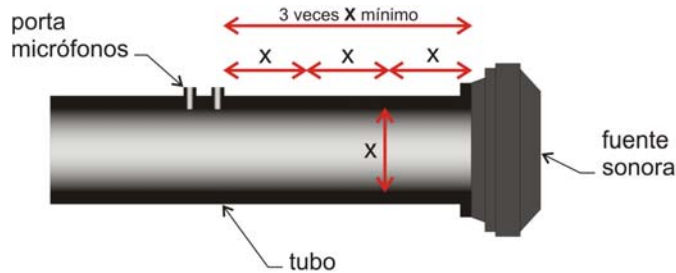


Fig. 5.4. Largo del tubo y separación entre la fuente sonora y el micrófono más cercano.

- **Orificio de desfogue** – Se sugiere realizar un pequeño orificio de desfogue de 1 a 2 mm de diámetro cerca de la fuente sonora y lejos de la posición de los micrófonos y sellarlo al momento de realizar alguna medición (fig. 5.5). El orificio tiene la función de evitar la variación de presión al momento de cambiar la muestra o micrófonos, ya que estos últimos podrían dañarse a causa de la deflexión del diafragma.

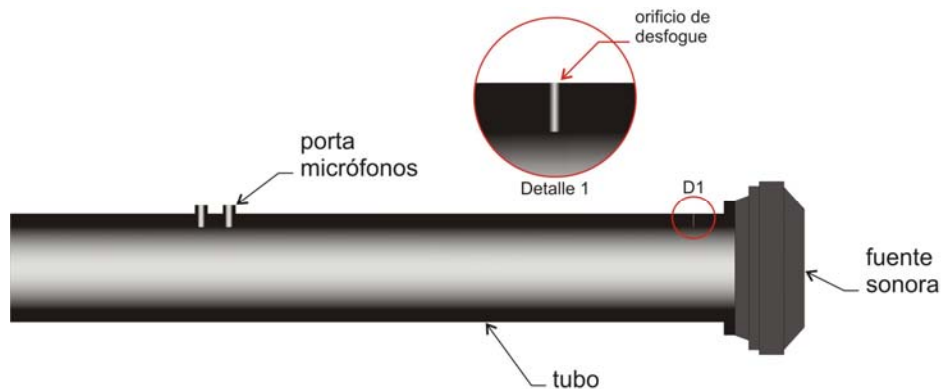


Fig. 5.5. Orificio de desfogue.

Porta muestras:

- **Características** – El porta muestras puede estar integrado al tubo o de manera separada por medio de una extensión del mismo diámetro interno que el tubo, como se observa en la figura 5.6.

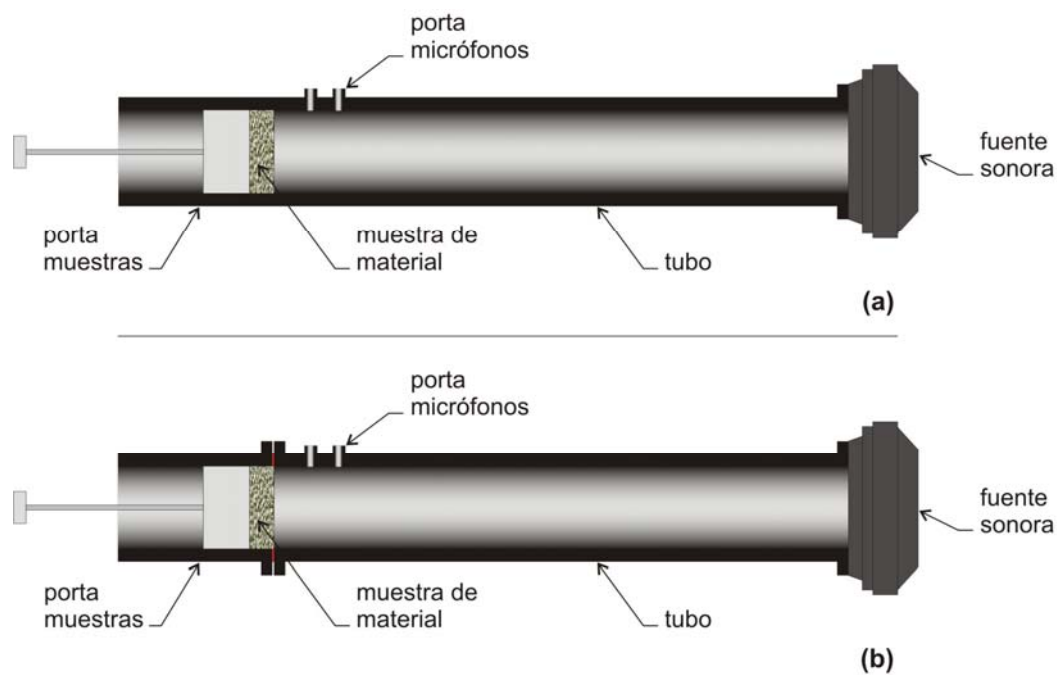


Fig. 5.6. Porta muestras: (a) integrado al tubo y (b) como una extensión del tubo.

- **Acoplamiento** – Si el porta muestras es desmontable, la unión con el tubo debe acoplarse para sellar perfectamente y evitar fugas de sonido que pueden afectar la medición, por lo que se recomienda algún empaque de caucho o silicón (fig. 5.7).

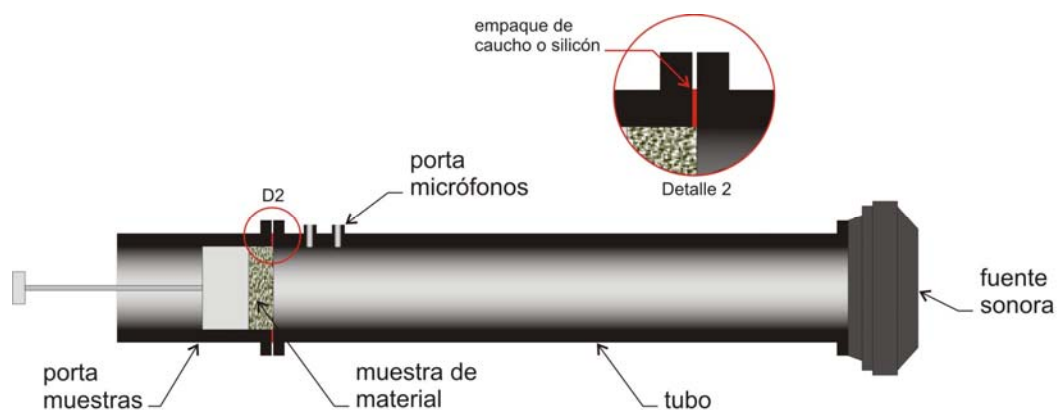


Fig. 5.7. Acoplamiento con empaque de caucho o silicón.

- **Respaldo** – Por otra parte, el respaldo que recibe la muestra debe ser rígido (la norma sugiere un espesor de 20 mm) (fig. 5.8).

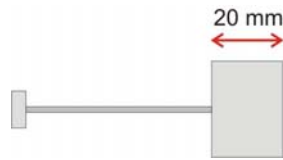


Fig. 5.8. Respaldo de la muestra.

Fuente sonora:

- **Acoplamiento** – Se debe considerar un acoplamiento para colocar la fuente sonora al otro extremo del tubo, ésta debe colocarse de manera coaxial al tubo, para asegurar que produzca una respuesta de potencia uniforme en todo el rango de frecuencias de interés (fig. 5.9).

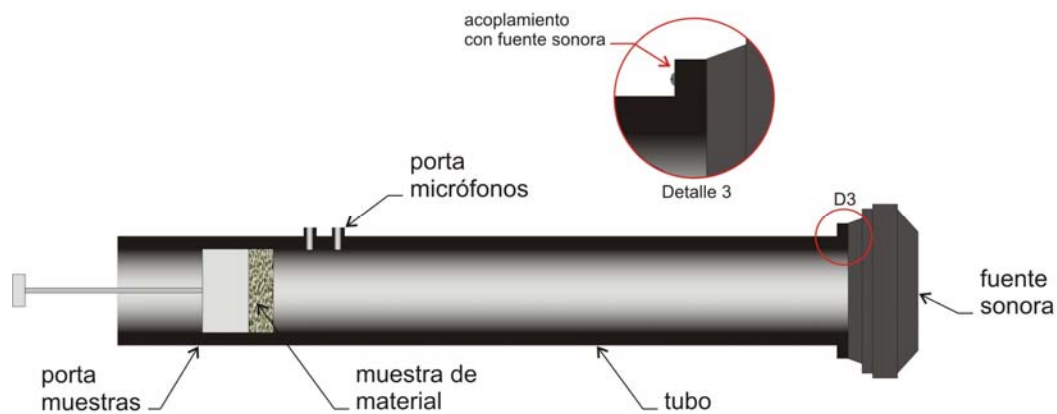


Fig. 5.9. Acoplamiento entre tubo y fuente sonora.

- **Aislamiento** – El acoplamiento entre el tubo y la fuente debe sellarse perfectamente para minimizar las vibraciones transmitidas a través de la estructura del tubo de impedancias, producidas por la fuente sonora.

Micrófonos:

- **Diámetro** – Deben considerarse dos porta micrófonos, donde deberán colocarse dos micrófonos de características idénticas. Los porta micrófonos, deben ser más grandes en comparación a los micrófonos a utilizar (fig. 5.10). Se recomienda que el diámetro de

los micrófonos sea inferior al 20% de la longitud de onda de la frecuencia más alta a estudiar.

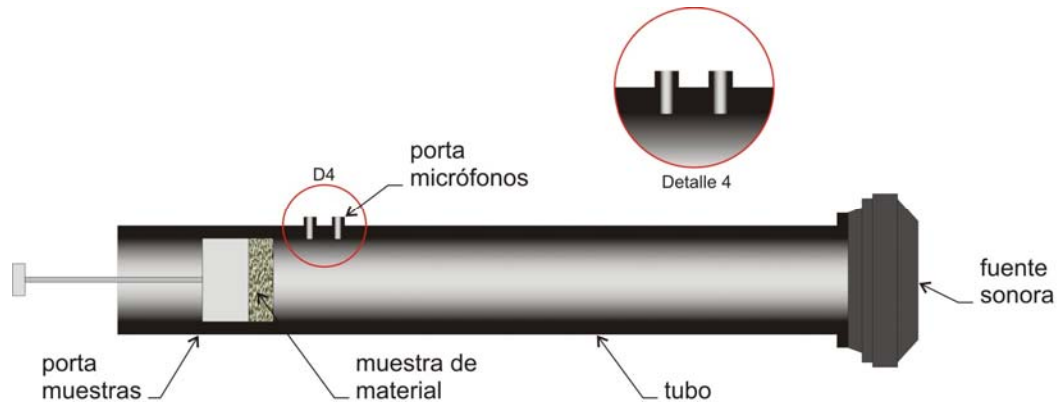


Fig. 5.10. Porta micrófonos.

- **Ventilación de los micrófonos** – Los micrófonos están diseñados con un orificio de ventilación para permitir la compensación de presión estática en su diafragma, por lo que debe considerarse no impedir esta ventilación tanto al interior como al exterior del tubo. Cada puerta micrófonos, debe sellarse perfectamente al momento de instalar los micrófonos para evitar fugas (fig. 5.11), las cuales pueden interferir en el correcto funcionamiento de los micrófonos, provocando cambios significativos en la respuesta a bajas frecuencias.

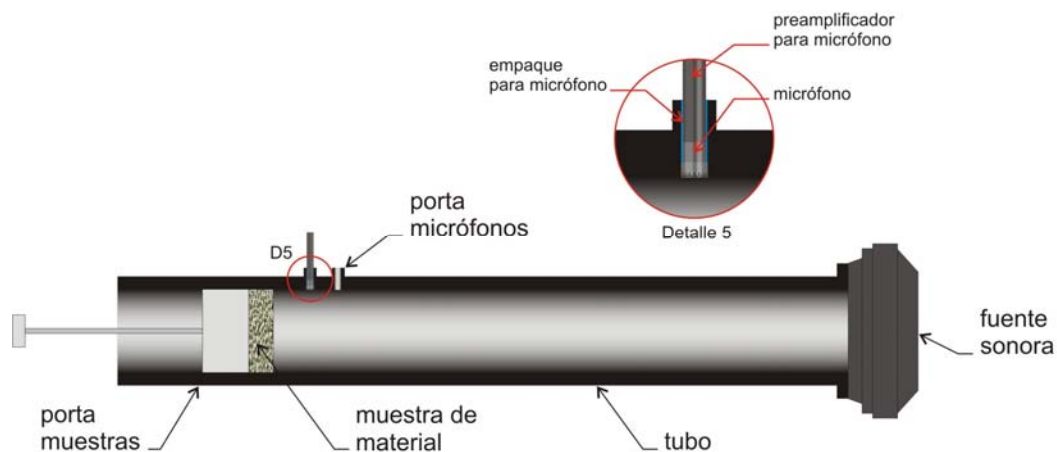


Fig. 5.11. Sellamiento de los porta micrófonos.

- **Espaciamiento** – Una amplia separación entre micrófonos mejora la precisión de las mediciones, sin embargo, se recomienda que la máxima separación entre micrófonos sea de un 80% de la relación entre la velocidad del sonido con la frecuencia máxima.
- **Ubicación** – La distancia mínima entre la muestra y el micrófono más cercano depende en cierta forma de las características de la superficie de la muestra. A fin de mantener una mayor relación de señal ruido, la distancia mínima entre la muestra y el micrófono puede manipularse de la siguiente forma: para superficies lisas, el micrófono más cercano puede estar a una distancia equivalente a la mitad del diámetro interno del tubo; para superficies no homogéneas, el micrófono más cercano debe estar al menos a una distancia de una vez el diámetro interno del tubo; y para superficies asimétricas, el micrófono más cercano debe estar al menos a una distancia de dos veces el diámetro interno del tubo, como se observa en la figura 5.12.

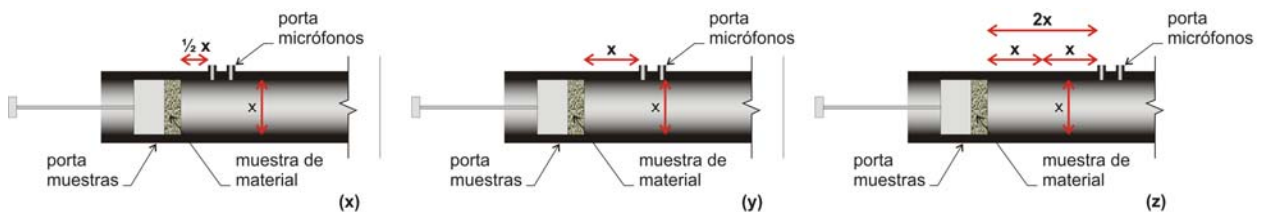


Fig. 5.12. Distancia entre la muestra de material y micrófono más cercano: (x) para superficies lisas, (y) para superficies no homogéneas y (z) para superficies asimétricas.

- **Montaje** – Por último, debe considerarse la forma de sostener los micrófonos en los porta micrófonos, pues es deseable que el diafragma de cada micrófono se ubique a ras de la superficie interna del tubo (fig. 5.13). La norma propone dos montajes distintos, uno requiere un pequeño tope para limitar la profundidad que alcanzará cada micrófono hasta la superficie interna del tubo⁴⁵, y el otro contempla una especie de agarradera desde el amplificador para sujetarlo.

⁴⁵ Este montaje tiene la desventaja de que se forman unas pequeñas hendiduras entre el tope y el diafragma del micrófono, provocando que la cara del diafragma no quede a ras de la superficie interna del tubo.

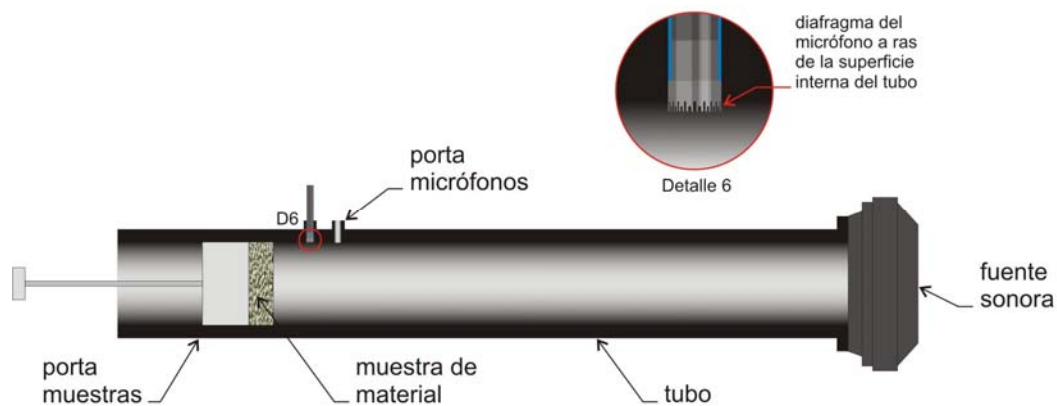


Fig. 5.13. Diafragma del micrófono ubicado a ras de la superficie interna del tubo.

Una vez definidas las consideraciones de diseño y cálculos por parte de la norma, se procedió al diseño de cada una de las partes que componen al tubo de impedancias (los planos e imágenes digitales de cada uno de los elementos, pueden consultarse en el Anexo 1). Posteriormente se adquirió el material y se continuó con la manufactura del tubo de impedancias (para el proceso de manufactura, referirse al Anexo 2):

Tubo:

- **Sección** – En relación a la sección del tubo, se optó por una circular. Se seleccionó un tubo hidráulico honeado⁴⁶ (fig. 5.14) para asegurar que la parte interna del tubo estuviera totalmente uniforme y alineada, y lo suficientemente maciza para evitar vibraciones.



Fig. 5.14. Tubo hidráulico honeado.

⁴⁶ Es un tubo de acero al carbón (acero 1026) estirado sobre mandril, que tiene la característica de poseer sus paredes rectificadas y tersas, de un espesor considerable y alta resistencia.

Antes de comenzar con la manufactura del tubo, la cara interna del mismo se sometió a un proceso de cromado duro⁴⁷ (fig. 5.15) de 2 milésimas de acabado (para el proceso de cromado duro, ver Anexo 2), para dejar la superficie libre de poros y con un acabado liso, así como para evitar la oxidación del tubo.



Fig. 5.15. Cromado de la cara interna del tubo.

- **Rango de frecuencias a estudiar y diámetro** – En los alcances del experimento se comentó la necesidad de medir el coeficiente de absorción sonora de los materiales en las frecuencias de 5 kHz y 10 kHz. Sin embargo, para alcanzar la frecuencia de 10 kHz era necesario un tubo de un diámetro interno menor a una pulgada (de 3/4" aproximadamente), lo cual fue difícil de conseguir debido a que las medidas comerciales del tubo hidráulico honeado van desde 1 1/2" (diámetro interno) x 1 7/8" (diámetro externo) el más pequeño, hasta 10" (diámetro interno) x 11 1/4" (diámetro externo) el más grande. Por otra parte, se seleccionó este tipo de tubo por la factibilidad de maquinado, ya que es muy complicado construir un tubo de dimensiones pequeñas, que esté rectificado, liso y sin costuras.

Para el desarrollo del tubo de impedancias, se seleccionó un tubo con dimensiones de 1 1/2" x 2" de diámetro interno y externo respectivamente. Una vez conocidas las magnitudes, se aplicó la fórmula que establece la norma para determinar la frecuencia máxima a alcanzar en relación al diámetro interno del tubo. La ecuación 5.1 determina que:

⁴⁷ Es un proceso que se basa en la electrólisis mediante el cual se recubren algunos metales con una película de cromo, de un espesor variable. El cromo duro se aplica con el fin de dar un acabado liso y resistente a la superficie de los metales, también posee una gran resistencia a la abrasión y corrosión.

$$f_u = Kc / d \quad (\text{ec.5.1})$$

donde, f_u es el límite de la frecuencia máxima, K es una constante (0.586), c es la velocidad del sonido en metros por segundo (344 m/s⁴⁸) y d es el diámetro interno del tubo en metros (0.0381 m).

Sustituyendo valores en la ecuación 5.1, se tiene:

$$f_u = 0.586 (344 \text{ m/s}) / 0.0381 \text{ m}$$

$$f_u = 5\,290.91 \text{ Hz}$$

Por lo anterior se determina que el rango de frecuencia máximo a alcanzar en el tubo de impedancias es 5 290.91 Hz, obteniendo datos por lo tanto sólo en la frecuencia de 5 kHz, quedando fuera la de 10 kHz.

Ahora bien, conociendo el diámetro interno y externo del tubo, puede determinarse el espesor del mismo y puede comprobarse si éste está dentro del 5% en relación al diámetro interno del tubo que sugiere la norma. La ecuación 5.2 establece que:

$$e = D - d / 2 \quad (\text{ec. 5.2})$$

donde, e es el espesor del tubo en metros, D es el diámetro externo del tubo expresado en metros (0.0508 m) y d es el diámetro interno del tubo en metros (0.0381 m).

Sustituyendo valores en la ecuación 5.2, se tiene:

$$e = (0.0508 \text{ m}) - (0.0381 \text{ m}) / 2$$

$$e = 0.00635 \text{ m}$$

⁴⁸ Velocidad del sonido a una temperatura de 20 °C.

Obteniendo la relación de porcentaje entre el diámetro interno y el espesor del tubo, la ecuación 5.3 determina que:

$$p = e / d \quad (\text{ec. 5.3})$$

donde, p es la relación de porcentaje, e es el espesor del tubo en metros y d es el diámetro interno del tubo en metros (0.0381 m).

Sustituyendo valores en la ecuación 5.3, se tiene:

$$p = 0.00635 \text{ m} / 0.0381 \text{ m}$$

$$p = 0.166, \text{ o sea el } 17\%$$

Por lo que el espesor del tubo está dentro del rango sugerido por la norma para evitar vibraciones.

- **Largo** – El tubo se dividió en dos secciones; la primera es donde se propagan las ondas y la segunda es el porta muestras. La longitud efectiva del tubo es de 90 cm, suficiente para permitir la generación de ondas planas.
- **Orificio de desfogue** – Para regular la variación de presión al momento de cambiar la muestra o los micrófonos, se realizó un pequeño orificio de 2 mm (dimensión sugerida por la norma) cerca de la ubicación de la fuente sonora. Este orificio se sella por medio de un elemento cilíndrico metálico recubierto con plastisol⁴⁹ para asegurar el sellado.

⁴⁹ El plastisol es la mezcla de una resina de PVC con otros aditivos de propiedades visco-elásticas, los cuales se encuentran en estado líquido a temperatura ambiente. Cuando el plastisol es sometido a un proceso de calor cambia su comportamiento, al pasar de estado líquido a sólido. El plastisol es utilizado en la fabricación de juguetes, telas plásticas, sellos, recubrimiento de partes metálicas como las asas de herramientas, tuberías y demás. (<http://www.himsa.com.mx/>)

Porta muestras:

- **Características** – El porta muestras se consideró como un elemento independiente al tubo de impedancias. El porta muestras se acopla al tubo y tiene el mismo diámetro interno y externo que éste.
- **Acoplamiento** – El acoplamiento entre el porta muestras y el tubo, se logró por medio de dos bridas, las cuales tienen un empaque de silicón en la unión de ambas para asegurar el sellado.
- **Respaldo** – Para recibir la muestra, se diseñó un pistón de base dura y espesor considerable (mayor al mínimo recomendado por la norma), sostenido por un vástago. Este elemento tiene la cualidad de poder deslizarse por el porta muestras.

Fuente sonora:

- **Acoplamiento** – Para el acoplamiento entre la fuente sonora y el tubo de impedancias, tuvo que realizarse una cuerda en el extremo del tubo para recibir al driver⁵⁰ o fuente sonora.
- **Aislamiento** – Para el aislamiento entre la fuente sonora y el tubo de impedancias, se diseñó una brida con las dimensiones de la fuente y diámetro interno del tubo. La unión entre la brida y la fuente, sella perfectamente.

Micrófonos:

- **Diámetro** – Se colocaron dos porta micrófonos de 0.014 m para micrófonos de 1/2" (0.0127 m). Como menciona la norma, estos porta micrófonos deben ser un poco más grandes en comparación a los micrófonos a utilizar.

⁵⁰ En este caso, nos referimos a driver como a una bocina, altavoz o parlante, procedente del idioma inglés.

- **Ventilación de los micrófonos** – Para la sujeción de los micrófonos, se diseñaron dos “camisas” de plastisol para cada uno, las cuales actúan como sellador entre el micrófono y el porta micrófono, y así evitar fugas que interfieran en el correcto funcionamiento de la ventilación de los micrófonos.
- **Espaciamiento** – El espaciamiento entre micrófonos depende en gran medida de la frecuencia máxima a estudiar, en este caso se considerará la frecuencia máxima que alcanza el tubo de impedancias (5 290.91 Hz). La norma especifica una ecuación para su determinación (ecuación 5.4):

$$s = (0.8) (c / 2 f_u) \quad (\text{ec. 5.4})$$

donde, s es la separación entre micrófonos, 0.8 es el porcentaje de separación, c es la velocidad del sonido en metros por segundo (344 m/s) y f_u es el límite de frecuencia máxima que alcanza el tubo de impedancias expresada en Hertz (5 290.91 Hz).

Sustituyendo valores en la ecuación 5.4, se tiene:

$$s = (0.8) ((344 \text{ m/s}) / 2 (5\,290.91 \text{ Hz}))$$

$$s = 0.026 \text{ m}$$

Por lo tanto, se tiene que el espaciamiento entre micrófonos será de 2.6 centímetros.

- **Ubicación** – Debido a que la distancia entre la muestra y el micrófono más cercano depende de las características de la superficie de la muestra y la norma sugiere diversas distancias mínimas en relación a esto, se optó por colocar el porta micrófono más cercano a una distancia de dos veces el diámetro interno del tubo (0.0508 m), considerando que pueda medirse el coeficiente de absorción de materiales con características superficiales distintas.

- **Montaje** – Con el empleo de las “camisas” de plastisol para cada micrófono, se logra manipular y controlar la colocación de los micrófonos a ras de la superficie interna del tubo.

Una vez manufacturadas todas las partes del tubo de impedancias, se recubrieron con un sellador y se pintaron cada una de ellas. La figura 5.16 muestra el tubo terminado y unido, también se observa el acoplamiento de la fuente sonora en un extremo.



Fig. 5.16. Tubo de impedancias final.

5.3.1.1.1.2. Equipo e instrumentos complementarios

En la norma se sugieren equipo e instrumentos complementarios al tubo de impedancias para realizar las mediciones, como se muestra en la figura 5.17. Según la norma, el tubo debe contemplar el uso de una fuente sonora, dos micrófonos y un sistema digital de análisis de frecuencias de dos canales

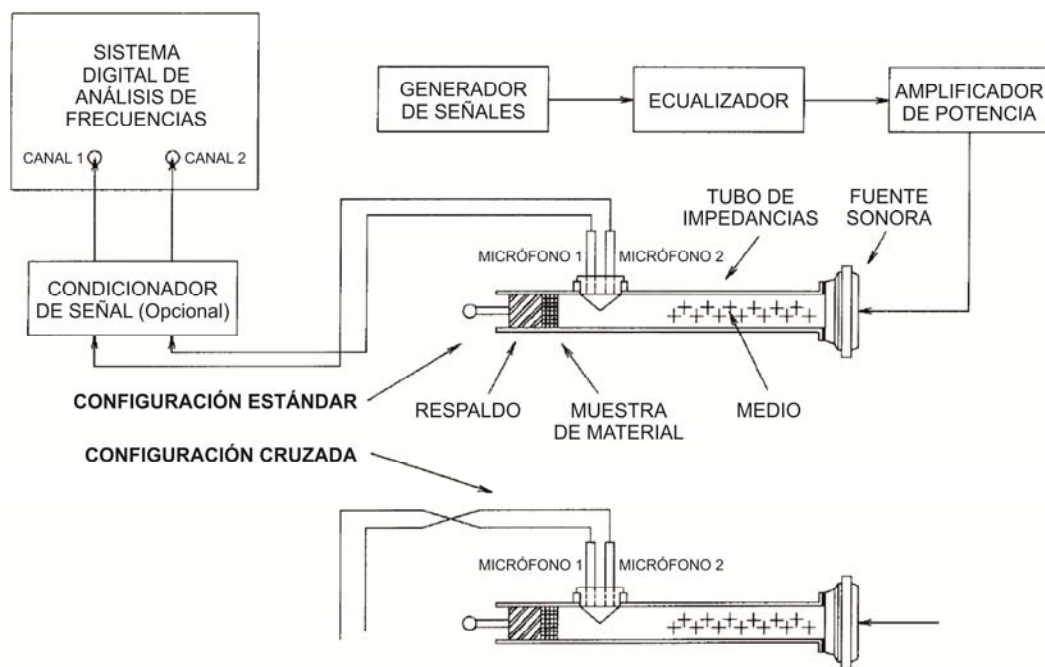


Fig. 5.17. Equipo e instrumentos complementarios. (Adaptada de: ASTM E1050 – 98)

En esta sección, se describe el equipo e instrumentos necesarios en relación a un Sistema de Adquisición de Datos diseñado por alumnos de UPIITA del IPN, el cual se describirá con mayor detalle más adelante.

El Sistema de Adquisición de Datos se basa en el manejo y acoplamiento del equipo e instrumentos, controlados mediante una computadora de escritorio o portátil. La comunicación del sistema se logra por comunicación GPIB y IEEE-488⁵¹. Se propuso este tipo de comunicación, debido a que el Analizador en tiempo real NOR 840 cuenta con este protocolo de comunicación.

⁵¹ A finales de 1960 *Hewlett-Packard* (HP) desarrolló el primer bus de datos, llamándolo HP-IB (*Hewlett-Packard Instrument Bus*), para conectar y controlar instrumentos programables fabricados por HP. Con el paso del tiempo otros fabricantes copiaron y mejoraron el HP-IB, llamándolo GPIB (*General Purpose Instrumentation Bus*), sin embargo con la inclusión de controladores digitales y equipo programable de diferentes proveedores, surgió la necesidad de crear un bus de datos estándar y de alta velocidad, por lo que en 1975 el *Institute of Electrical Electronic Engineers* (IEEE) lo estandarizó llamándolo IEEE-488.

En la actualidad al bus de datos se le conoce con tres nombres en todo el mundo: Bus de Interfaz de Uso General o *General Purpose Instrumentation Bus* (GPIB), Bus de Interfaz *Hewlett-Packard* o *Hewlett-Packard Instrument Bus* (HP-IB) y Bus IEEE 488.

Un bus de datos es un transmisor de datos entre computadoras y equipos como multímetros, osciloscopios, etc. (<http://es.wikipedia.org/>)

Como equipo e instrumentos complementarios para realizar la medición, basándonos en el Sistema de Adquisición de Datos antes mencionado, se tienen: una computadora de escritorio o portátil, un generador de funciones, un amplificador de potencia, un driver o fuente de excitación, micrófonos, preamplificadores para micrófono, una tarjeta PCI-GPIB+NI-488.2 para computadora de escritorio, una tarjeta GPIB-USB-HS para computadora portátil, un cable GPIB y un Analizador en tiempo real. A continuación se describen cada uno de ellos.

Computadora de escritorio o portátil

La norma especifica el uso de una computadora de escritorio o portátil como parte del sistema digital de análisis de frecuencias. En este caso se utilizaron las dos modalidades de computadora (fig. 5.18 y 5.19), ya que la medición en el tubo de impedancias no es necesaria que se realice dentro del laboratorio, por lo que el uso de una computadora portátil puede ser más accesible.

El *software* (*Medición Tubo 2.92*) del Sistema de Adquisición de Datos fue instalado en ambas computadoras, sin embargo fue necesario instalar una tarjeta PCI-GPIB+NI-488.2 (para *Windows Vista*, XP, 2000) dentro de la computadora de escritorio para establecer una correcta comunicación con el analizador. El objetivo es manipular lo más posible al analizador NOR 840 a partir de una computadora para realizar las mediciones.



Fig. 5.18 y 5.19. Computadora de escritorio y portátil. (<http://www.pc-offices.com/>, <http://news.idealco.co.uk/>)

Generador de funciones

Un generador de funciones, también conocido como un generador de señales u ondas, es un aparato electrónico que genera patrones de onda sinusoidales, cuadradas, triangulares y dientes de sierra, además de crear señales TTL⁵².

Los generadores de onda actualmente pueden ser controlados desde una computadora por medio de un *software* y se usan frecuentemente dentro del campo del audio.

El generador de funciones utilizado en esta tesis fue de la marca *Agilent*, modelo 33210A (fig. 5.20), el cual es compatible con el protocolo de comunicación GPIB y IEEE-488. Puede crear ondas en forma sinusoidal y cuadrada hasta 10 MHz, produce ondas triangulares, en pulsos, en rampas y en ruido. Tiene un desempeño hasta 10 MHz, suficiente para nuestra necesidad.

Este equipo se manipulará desde la computadora para la generación de ondas en frecuencias específicas o en un rango determinado.



Fig. 5.20. Generador de funciones *Agilent*, modelo 33210A. (Imagen tomada del manual de *National Instruments*)

Amplificador de potencia

El propósito de un amplificador de potencia, es como su nombre lo indica, amplificar las señales sin distorsionarlas.

El amplificador de potencia empleado en este experimento fue de la marca *Crest Audio*, modelo HD4 (fig. 5.21), tiene una respuesta en frecuencia de 20 Hz a 20 000 Hz (dentro del margen

⁵² Una señal TTL es un circuito electrónico digital. TTL son las siglas en inglés de *transistor-transistor logic*, es decir "lógica de transistor a transistor". (<http://digital.ni.com/>)

requerido) y se empleará como acoplamiento entre el driver o fuente excitación y el generador de funciones. La ventaja de este amplificador es que es compatible con la fuente de excitación a utilizar.



Fig. 5.21. Amplificador de potencia *Crest Audio*, modelo HD4. (<http://www.liveline.be/>)

Driver o fuente excitación

El driver utilizado como fuente de excitación fue de la marca *B&C SPEAKERS*, modelo DE900TN (fig. 5.22), tiene un diámetro de garganta de 36 mm (muy cercano al diámetro interno del tubo de impedancias) y trabaja en un rango de frecuencias de 0.5 a 18 kHz (suficiente para generar los 5 kHz requeridos). El driver se acoplará al tubo de impedancias en un extremo.

Los alumnos de UPIITA realizaron un análisis de flexión y deformación en el tubo con diferentes fuentes de excitación, siendo ésta la que mejor se comportaba.



Fig. 5.22. Driver *B&C SPEAKERS*, modelo DE900TN. (<http://www.bcspeakers.com/>)

Micrófonos

Se utilizaron dos micrófonos de presión de 1/2" tipo 40AP de la marca G.R.A.S. (fig. 5.23). Este tipo de micrófonos son de uso general y abarcan un rango de respuesta en frecuencias desde 3.15 HZ hasta 10 kHz. Debido a su alto grado de sensibilidad, se puede medir el nivel de presión sonora por debajo de los 17 dB.



Fig. 5.23. Micrófono de presión de 1/2" G.R.A.S., tipo 40AP. (Imagen tomada del manual de G.R.A.S)

Preamplificador para micrófono

Los micrófonos deben ir conectados a un preamplificador, el cual modulará, amplificará y enviará la señal al analizador. Los preamplificadores utilizados fueron *Norsonic* para micrófonos de 1/2" (fig. 5.24).



Fig. 5.24. Preamplificador de 1/2" *Norsonic*. (<http://www.directindustry.com/>)

Tarjeta PCI-GPIB+488.2

La tarjeta PCI-GPIB+488.2 para *Windows Vista*, XP y 2000 (fig. 5.25) se instaló en la computadora de escritorio para establecer el protocolo de comunicación GPIB con el analizador NOR 840.

Debido a que la tarjeta tiene un controlador interno instalado, la transferencia de datos ocurre sin interrupciones en el microprocesador. La velocidad de transferencia de datos es mayor a 1.5 MB por segundo para una comunicación IEEE-488.

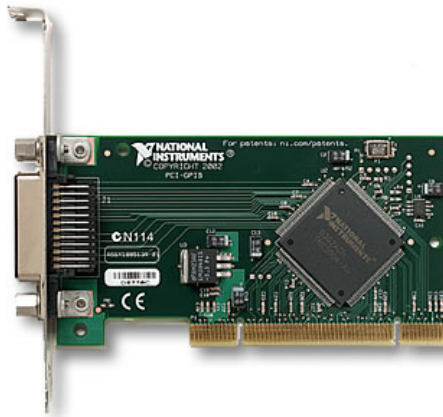


Fig. 5.25. Tarjeta PCI-GPIB+488.2 *National Instruments*. (<http://www.ni.com/>)

Tarjeta GPIB-USB-HS

Ya que en la computadora portátil no puede instalarse una tarjeta PCI-GPIB+488.2 para establecer la comunicación con el analizador, fue necesario conectar una tarjeta GPIB-USB-HS (fig. 5.26) (vía USB), la cual tiene incluido el *software* del protocolo de comunicación GPIB. La velocidad de transferencia de datos es mayor a 1.8 MB por segundo para una comunicación IEEE-488.



Fig. 5.26. Tarjeta GPIB-USB-HS *National Instruments*. (Imagen tomada del manual de *National Instruments*)

Cable GPIB

Los cables GPIB pueden poseer un blindaje doble o sencillo. Se fabrican en longitudes de 1, 2, 4 y 8 metros. Son cables hembra macho (fig. 5.27).

La función básica de estos cables es establecer la comunicación entre protocolos GPIB. En este caso se utilizaron para comunicar la computadora de escritorio o portátil con el analizador NOR 840.



Fig. 5.27. Cable GPIB *National Instruments*. (<http://www.linearx.com/>)

Analizador NOR 840

El analizador en tiempo real que se utilizó fue marca *Norsonic* modelo 840, conocido en el mercado como NOR 840 (fig. 5.28). Este dispositivo cuenta con dos canales en bandas de octava, tercios de octava y un análisis fraccional estrecho en bandas de octava para recibir y enviar información. El rango de frecuencias con el que trabaja el analizador va desde los 0.1 Hz hasta los 20 kHz.

Con este dispositivo se pueden realizar mediciones de niveles de presión sonora, mediciones del tiempo de reverberación, mediciones en FFT⁵³, mediciones de intensidad y potencia sonora.

Este equipo se utilizó como un sistema digital de análisis de frecuencias y señales, el cual enviará los datos obtenidos de los micrófonos a la computadora por medio de una comunicación GPIB. Los datos enviados son en formato .txt, los cuales pueden manipularse en hojas de cálculo.

⁵³ FFT es un acrónimo proveniente de *Fast Fourier Transform* en inglés (Transformada Rápida de Fourier), referente a un algoritmo. La FFT es empleada comúnmente en el tratamiento de señales. (<http://delta.cs.cinvestav.mx/>)



Fig. 5.28. Analizador en tiempo real *Norsonic*, modelo 840.

5.3.1.2. Cálculo del coeficiente de absorción sonora

Como parte del Sistema de Adquisición de Datos diseñado por los alumnos de UPIITA del IPN, tuvo que desarrollarse una interfaz⁵⁴ entre la computadora y los equipos e instrumentos.

El programa con el que se desarrolló la interfaz o el *software* especializado fue *Visual Basic*, el cual posee una aplicación compatible con el protocolo de comunicación GPIB y IEEE-488. Dicho protocolo lo contienen el analizador en tiempo real NOR 840, el generador de funciones y las tarjetas PCI-GPIB+488.2 y GPIB-USB-HS instaladas en las computadoras.

El *software* (*Medición Tubo 2.92*) funciona con un sistema operativo de *Windows*, XP o Vista y su función es mandar instrucciones desde la computadora al analizador NOR 840 y al generador de funciones para emitir una señal y comenzar la medición. Una vez realizada la medición, el analizador NOR 840 recoge la señal recibida por los micrófonos para analizarla y procesarla. Ya que la señal fue analizada y procesada, el analizador NOR 840 envía los datos a la computadora para la determinación del coeficiente de absorción sonora de los materiales, con base a las expresiones matemáticas establecidas en la Norma ASTM E1050 – 98. Los resultados pueden visualizarse en forma de gráficas o en archivos .txt.

⁵⁴ Según la Real Academia Española, una interfaz es la conexión física y funcional entre dos aparatos o sistemas independientes, estableciendo una comunicación entre ellos.

Con el *software* pueden determinarse diferentes propiedades acústicas de los materiales, tales como: coeficiente de absorción sonora, impedancia acústica, resistencia acústica, entre otros, siendo de interés sólo el coeficiente de absorción sonora.

La figura 5.29, muestra la ventana de inicio del *software* especializado. Si el equipo está correctamente conectado, se debe mostrar una leyenda en la sección de Informe, indicando que los dispositivos están activados y funcionando correctamente. En esa misma sección se muestra la fecha de la última calibración del tubo de impedancias.

La ventana contiene tres menús principales: *Medir*, *Consultar* y *Ayuda*.



Fig. 5.29. Ventana de Inicio del *software Medición Tubo 2.92*.

En el menú de *Medir* se cuenta con la opción de calibrar el tubo, realizar una nueva medición de algún material y salir de la aplicación (fig. 5.30).



Fig. 5.30. Menú *Medir*.

Si se selecciona la opción de *Calibrar* del menú *Medir*, aparecerá una ventana como en la figura 5.31. En la ventana se muestra un esquema general de los elementos que componen al tubo de impedancias. Si se elige realizar una calibración, el *software* indicará en qué momento cambiar los micrófonos de posición, retirar y colocar la purga para dicho proceso.

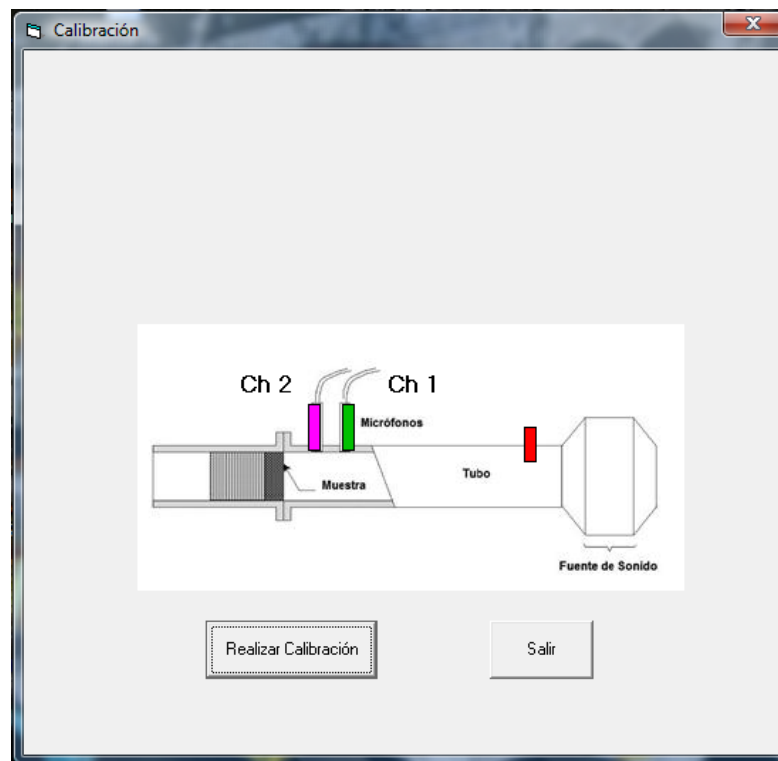


Fig. 5.31. Ventana para realizar una calibración del tubo de impedancias.

Por otra parte, si se opta por la opción de una *Nueva Medición* del menú *Medir*, aparecerá una ventana como en la figura 5.32. En esta ventana el *software* solicita datos necesarios para realizar la medición, entre ellos están: temperatura, presión atmosférica, espesor de la muestra, carrera del émbolo⁵⁵, nombre del material (nombre con el que se registrará la medición) y comentario (es opcional y quedará registrado cuando se consulte dicha medición).

La figura 5.33 ejemplifica los datos introducidos para realizar una medición de una muestra de Unicel⁵⁶. Nótese que al momento de incluir datos como temperatura y presión atmosférica, la velocidad y densidad del aire se calculan automáticamente, esto debido a fórmulas introducidas al *software*. Además, el espesor y carrera del émbolo pueden expresarse en centímetros o en pulgadas. También puede observarse que en la parte inferior de la ventana, hay una barra de estado que indica en nivel de avance del proceso.

⁵⁵ Se refiere la distancia de la muestra introducida al porta muestras, la cual es la diferencia entre la longitud del porta muestras y el espesor de la muestra. Es importante conocer este dato, para determinar la distancia existente entre la muestra y el micrófono más cercano.

⁵⁶ Espuma de poliestireno expandido.

Medición

Datos

Temperatura °C

Presión Atmosférica kPa

Velocidad del aire m/s

Densidad del aire Kg/m3

Espesor cm pulg

Carrera del émbolo cm pulg

Distancia de la muestra al micrófono cm pulg

☒ Métrico ☐ Americano

Información

Nombre del material

Comentario

Iniciar Medición Ver Gráfica Salir

Fig. 5.32. Ventana para realizar una nueva medición.

Medición

Datos

Temperatura 25 °C

Presión Atmosférica 101.325 kPa

Velocidad del aire 346.151961735522 m/s

Densidad del aire 1.18183296998155E-03 Kg/m3

Espesor 1.0 cm 0 pulg

Carrera del émbolo 2.85 cm 0 pulg

Distancia de la muestra al micrófono 10.05 cm 3.93 pulg

☒ Métrico ☐ Americano

Información

Nombre del material UNICEL 2

Comentario ESPUMA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO

Iniciar Medición Ver Gráfica Salir

Fig. 5.33. Ejemplo de introducción de datos para realizar una medición con Unicel.

Una vez finalizada la medición, se activarán las opciones de *Ver Gráfica* y *Salir*. Si se selecciona *Ver Gráfica*, aparecerá una ventana como la que se muestra en la figura 5.34.

En la ventana se observa una gráfica que muestra el comportamiento del material en relación a su coeficiente de absorción sonora en diferentes frecuencias. Asimismo, del lado derecho de la ventana se observan los datos del coeficiente de absorción por frecuencia y una sección de *Búsqueda*, donde se ingresa la frecuencia de interés y automáticamente el sistema devuelve el dato del coeficiente de absorción más próximo a dicha frecuencia.

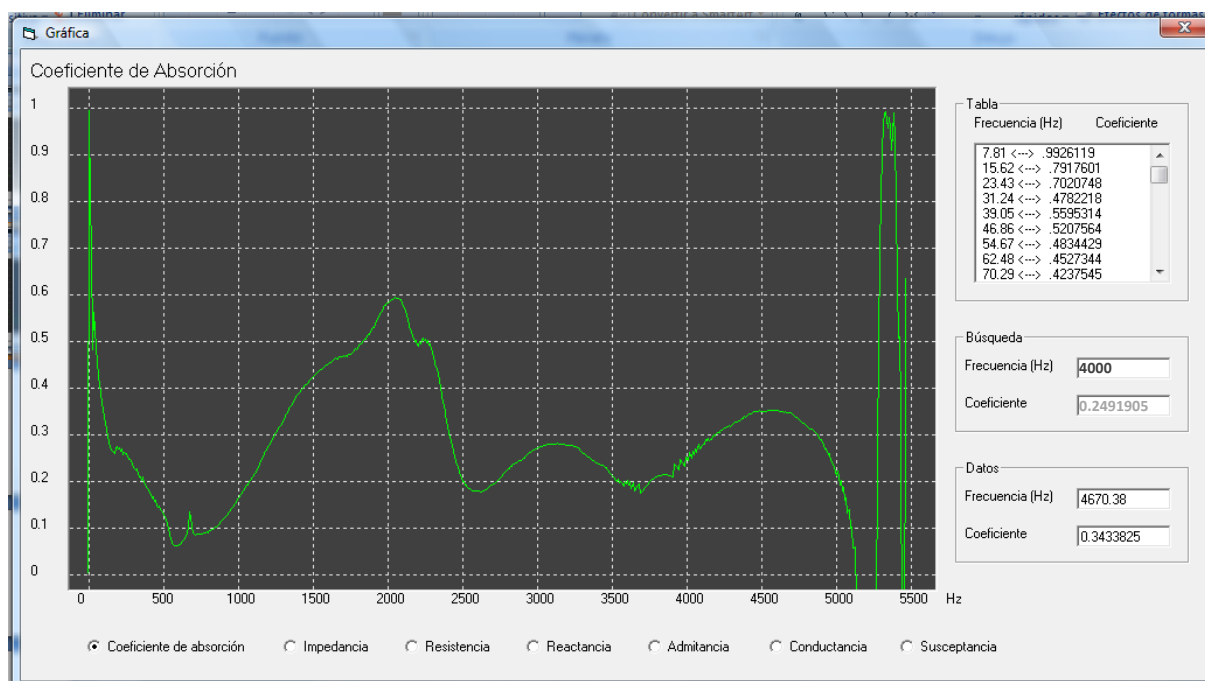


Fig. 5.34. Ventana que muestra la gráfica del comportamiento del coeficiente de absorción sonora de un material.

En el menú de *Consulta* de la ventana de inicio se despliega una opción para ver las mediciones previas (fig. 5.35). Al elegir esta opción se encontrará una lista de las mediciones realizadas, de las cuales al seleccionar alguna, se mostrará en una sección de Información: el nombre del material, algún comentario del mismo y la fecha en que se efectuó dicha medición (fig. 5.36).

En la ventana se encuentra la opción de consultar los resultados por medio de una gráfica (fig. 5.36), exportar los datos (formato .txt) y eliminar la medición.



Fig. 5.35. Menú *Consultar*.

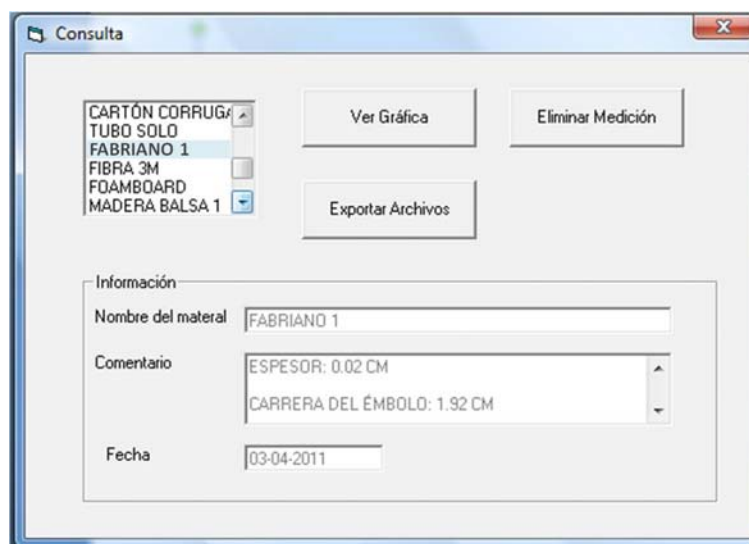


Fig. 5.36. Ventana de consulta.

En el menú de *Ayuda* de la ventana de inicio se muestra el tutorial (ver Anexo 3) con el procedimiento para conectar y configurar correctamente el equipo e instrumentos antes de iniciar una medición, calibrar los micrófonos y el tubo de impedancias.

5.3.1.2.1. Proceso de medición

Antes de realizar cualquier serie de mediciones, fue necesario recortar cada uno de los materiales seleccionados, para ello se solicitó el apoyo del Taller de Plásticos de la UAM-Azc.

Según la Norma ASTM E1050 – 98, la muestra debe tener la misma forma y área que la sección transversal del tubo de impedancias. Debe encajar perfectamente en el porta muestras, sin embargo no debe quedar muy apretada que sobresalga, o muy floja que exista espacio entre el canto de muestra y el tubo.

Para recortar las muestras de manera perfecta y del tamaño exacto a la sección transversal del tubo, se utilizó una cortadora *Laser*⁵⁷ (fig. 5.37) del Taller de Plásticos. Las imágenes de la figura 5.38, muestran el corte de varias muestras de una placa de madera balsa empleando la cortadora.



Fig. 5.37. Cortadora Laser de la UAM-Azc.

⁵⁷ Son máquinas que se controlan y programan desde una computadora para realizar cortes en diversos materiales. Se utilizan frecuentemente en el campo del diseño, arquitectura, en la industria maderera, entre otros.



Fig. 5.38. Corte de muestras de madera balsa.

Una vez que se tuvieron las muestras al tamaño exacto del diámetro interno del tubo, se montaron en el porta muestras como se observa en la figura 5.39, para después colocarlo en la otra sección del tubo y comenzar con el proceso de medición.



Fig. 5.39. Colocación de muestra en el porta muestras.

Ahora bien, el esquema de la figura 5.40 ejemplifica el proceso de medición según la Norma ASTM E1050 – 98 (ver figura 5.17) y el Sistema de Adquisición de Datos diseñado para este caso. Como se comentó en un inicio, el sistema se basa en el manejo y acoplamiento del equipo e instrumentos mediante un protocolo de comunicación GPIB y IEEE-488.

El proceso de medición inicia al momento de introducir los datos en el *software* instalado en la computadora de escritorio o portátil, la cual por medio de una tarjeta PCI-GPIB+NI-488.2 o GPIB-USB-HS respectivamente y un cable GPIB, manda dos órdenes simultáneas.

La primera orden es para el generador de funciones, el cual debe producir señales en el rango de frecuencias establecido en el *software*. La señal del generador se incrementará con el amplificador de potencia y esta a su vez se percibirá por el driver o fuente sonora.

La otra orden es para el analizador en tiempo real, el cual se encargará de analizar y procesar las señales recibidas por los micrófonos de presión, los cuales mandan la señal a través de un preamplificador para micrófonos. Una vez analizadas las señales, el analizador manda los datos a la computadora para la determinación del coeficiente de absorción sonora a través del *software* especializado. Los resultados pueden visualizarse en forma de gráficas o en archivos .txt., desde la computadora.

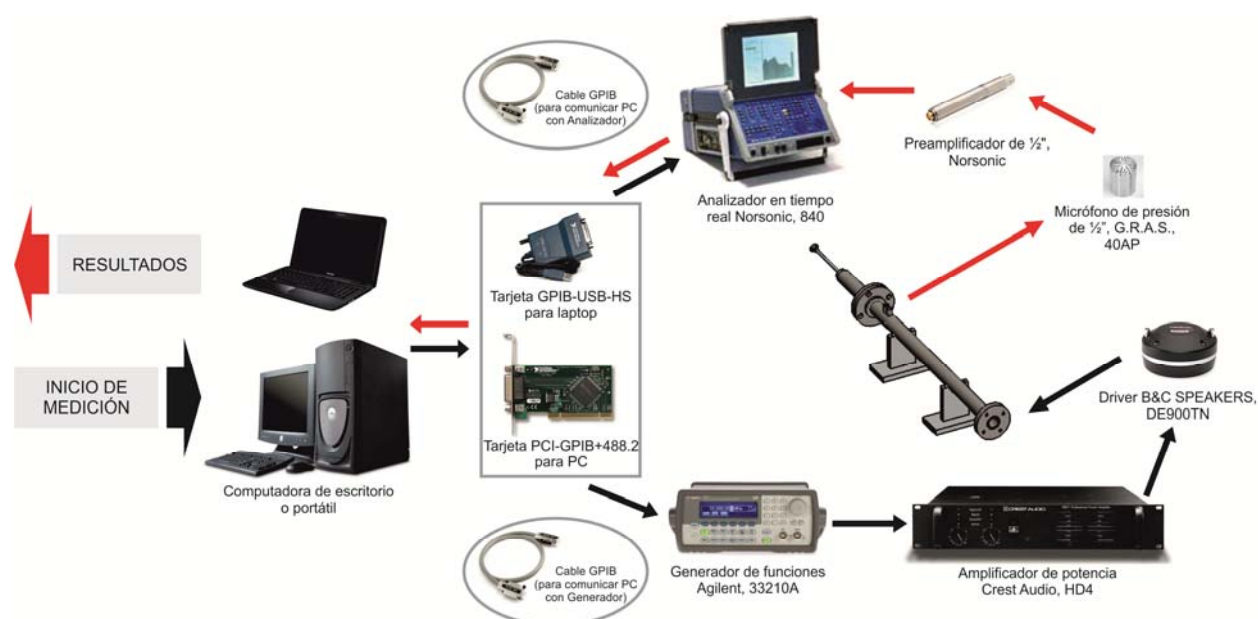


Fig. 5.40. Diagrama del proceso de medición para la obtención del coeficiente de absorción sonora.

Las mediciones se realizaron en un rango de frecuencias desde 125 Hz hasta 5 290 Hz aproximadamente, debido a los límites permitidos por el tubo de impedancias, argumentados en la sección 5.3.1.1.1.1 *Construcción del tubo de impedancias*.

5.3.1.2.2. Resultados obtenidos

En esta sección se validará el tubo de impedancias, se medirán materiales comúnmente utilizados en modelos físicos a escala, se seleccionarán algunos materiales para su comprobación en un modelo físico a escala y se hará una propuesta de clasificación de los mismos.

5.3.1.2.2.1. Validación del tubo de impedancias

Después de la fabricación del tubo de impedancias y del diseño del Sistema de Adquisición de Datos por parte de los alumnos de UPIITA, fue necesario realizar la comprobación del funcionamiento del tubo. Para dicho proceso, se adquirieron muestras de materiales con datos conocidos de coeficientes de absorción sonora.

Se midieron fibras de vidrio y fibras minerales, proporcionadas por *Owens Corning* y *Rolan* respectivamente (fig. 5.41 a 5.43).



Fig. 5.41 a 5.43. Muestras de fibras de vidrio y lanas minerales.

Entre los materiales medidos, se tienen los siguientes resultados:

- *Deco Sky* – Aislante termoacústico fabricado con fibra de vidrio aglutinada con resina fenólica (fig. 5.44). Se utiliza como plafón registrable para diversos espacios, tales como, oficinas, restaurantes, bibliotecas, entre otros.



Fig. 5.44. Muestra *Deco Sky*.

Se analizó una muestra de 5/8" de espesor. En la tabla 5.1 se muestran los valores por frecuencia del coeficiente de absorción sonora proporcionados por *Owens Corning*:

Coeficientes de absorción sonora						
Material	Frecuencia (Hz)					
<i>Deco Sky</i>	125	250	500	1000	2000	4000
	0.07	0.21	0.59	0.68	0.83	0.65

Tabla 5.1. Valores del coeficiente de absorción del material *Deco Sky*, proporcionados por la empresa.

En la tabla 5.2 se muestran los valores por frecuencia del coeficiente de absorción sonora medidos en tubo de impedancias:

Coeficientes de absorción sonora						
Material	Frecuencia (Hz)					
<i>Deco Sky</i>	125	250	500	1000	2000	4000
	-	0.01	0.07	0.23	0.84	0.50

Tabla 5.2. Valores del coeficiente de absorción del material *Deco Sky*, medidos en tubo de impedancias.

Los valores obtenidos en frecuencias bajas y medias tuvieron poca correlación (menores en tubo de impedancias), mientras que para las frecuencias altas, sobre todo en 2 000 Hz se obtuvieron valores similares.

- *QuietR AcousticR* – Aislante termoacústico fabricado con fibra de vidrio (fig. 5.45). Se emplea como aislante en ductos de aire acondicionado y calefacción.



Fig. 5.45. Muestra *QuietR AcousticR*.

Se analizó una muestra de 1" de espesor. En la tabla 5.3 se muestran los valores por frecuencia del coeficiente de absorción sonora proporcionados por *Owens Corning*:

Coeficientes de absorción sonora						
Material	Frecuencia (Hz)					
<i>QuietR AcousticR</i>	125	250	500	1000	2000	4000
	0.05	0.30	0.60	0.87	0.98	1.05

Tabla 5.3. Valores del coeficiente de absorción del material *QuietR AcousticR*, proporcionados por la empresa.

En la tabla 5.4 se muestran los valores por frecuencia del coeficiente de absorción sonora medidos en tubo de impedancias:

Coeficientes de absorción sonora						
Material	Frecuencia (Hz)					
<i>QuietR AcousticR</i>	125	250	500	1000	2000	4000
	-	0.02	0.20	0.47	0.89	0.95

Tabla 5.4. Valores del coeficiente de absorción del material *QuietR AcousticR*, medidos en tubo de impedancias.

Nuevamente, los valores obtenidos en frecuencias bajas y medias no coincidieron (menores en tubo de impedancias), mientras que para frecuencias altas, se obtuvieron valores muy cercanos.

- *Serie 700 Fiberglas* – Esta serie se compone de placas de aislamiento termoacústico fabricadas con fibra de vidrio aglutinadas con resina fenólica termoendurecible. Se moldean en placas flexibles, semirrígidas y rígidas de diversas densidades (fig. 5.46). Se

utilizan como elementos de absorción sonora en diferentes espacios, tales como, teatros, auditorios, estudios de radio, entre otros.



Fig. 5.46. Muestra Serie 700 *Fiberglas*.

Se analizó una muestra semirrígida de 1" de espesor. En la tabla 5.5 se muestran los valores por frecuencia del coeficiente de absorción sonora proporcionados por *Owens Corning*:

Coeficientes de absorción sonora						
Material	Frecuencia (Hz)					
<i>Serie 700 Fiberglas</i>	125	250	500	1000	2000	4000
	0.11	0.28	0.68	0.90	0.93	0.96

Tabla 5.5. Valores del coeficiente de absorción del material *Serie 700 Fiberglas*, proporcionados por la empresa.

En la tabla 5.6 se muestran los valores por frecuencia del coeficiente de absorción sonora medidos en tubo de impedancias:

Coeficientes de absorción sonora						
Material	Frecuencia (Hz)					
<i>Serie 700 Fiberglas</i>	125	250	500	1000	2000	4000
	-	0.04	0.20	0.68	0.93	1.00

Tabla 5.6. Valores del coeficiente de absorción del material *Serie 700 Fiberglas*, medidos en tubo de impedancias.

Al igual que en los casos anteriores, los valores en frecuencias bajas y medias tienen poca correlación y en frecuencias altas coinciden casi exactamente.

- *QuietR Duct Board* – Placa rígida de fibra de vidrio aglutinada con resinas. Posee un refuerzo de capa de aluminio (fig. 5.47). Se utiliza como aislante acústico para ductos de aire.

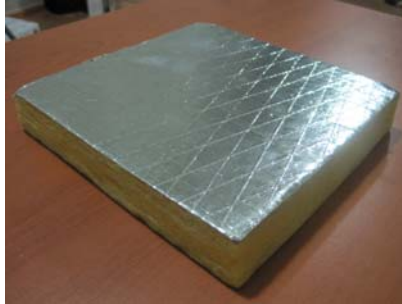


Fig. 5.47. Muestra *QuietR Duct Board*.

Se analizó una muestra de tipo 800 (densidad de 85 kg/m^3) de 1" de espesor. En la tabla 5.7 se muestran los valores por frecuencia del coeficiente de absorción sonora proporcionados por *Owens Corning*:

Coeficientes de absorción sonora						
Material	Frecuencia (Hz)					
<i>QuietR Duct Board</i>	125	250	500	1000	2000	4000
	0.08	0.19	0.69	0.94	0.99	0.98

Tabla 5.7. Valores del coeficiente de absorción del material *QuietR Duct Board*, proporcionados por la empresa.

En la tabla 5.8 se muestran los valores por frecuencia del coeficiente de absorción sonora medidos en tubo de impedancias:

Coeficientes de absorción sonora						
Material	Frecuencia (Hz)					
<i>QuietR Duct Board</i>	125	250	500	1000	2000	4000
	-	0.02	0.40	0.96	0.82	0.55

Tabla 5.8. Valores del coeficiente de absorción del material *QuietR Duct Board*, medidos en tubo de impedancias.

En este caso, los valores en frecuencias medias son cercanos a los proporcionados, mientras que para frecuencias altas se nota un deceso en el coeficiente de absorción sonora obtenido en tubo de impedancias.

- Fibra Mineral *Rolan* – Son placas de fibra mineral, fabricadas en diferentes densidades con eficientes valores de coeficiente de absorción sonora (fig. 5.48). Se emplean como aislantes acústicos en muros, plafones y pisos.



Fig. 5.48. Muestra Fibra Mineral *Rolan*.

Se analizó una muestra semirrígida con una densidad de 64 kg/m^3 de 51 mm de espesor. En la tabla 5.9 se muestran los valores por frecuencia del coeficiente de absorción sonora proporcionados por *Rolan*:

Coeficientes de absorción sonora						
Material	Frecuencia (Hz)					
<i>Fibra Mineral Rolan</i>	125	250	500	1000	2000	4000
	0.17	0.65	0.95	1.02	0.91	0.97

Tabla 5.9. Valores del coeficiente de absorción de fibra mineral de *Rolan*, proporcionados por la empresa.

Los valores del coeficiente de absorción sonora medidos en tubo de impedancias son (tabla 5.10):

Coeficientes de absorción sonora						
Material	Frecuencia (Hz)					
<i>Fibra Mineral Rolan</i>	125	250	500	1000	2000	4000
	-	0.15	0.55	0.93	0.91	0.98

Tabla 5.10. Valores del coeficiente de absorción de fibra mineral de *Rolan*, medidos en tubo de impedancias.

Los valores fueron muy cercanos en frecuencias altas, mientras que en frecuencias bajas y medias, nuevamente los valores obtenidos en tubo de impedancias fueron menores.

Analizando los resultados obtenidos en tubo de impedancias, se puede decir que el instrumento tiene una buena respuesta en frecuencias altas dependiendo de las características del material a medir, sin embargo no se puede asegurar esto en su totalidad, ya que en todos los casos los fabricantes señalan que las mediciones se realizaron conforme al método sugerido en la Norma ASTM C423 “*Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method*” y tipo de montaje A⁵⁸. Este método precisa el uso de una cámara reverberante para obtener el coeficiente de absorción sonora mediante la medición del decaimiento de la señal.

Según Silva et al. (2008), señalan que el método de cámara reverberante provee valores distintos a los obtenidos por el método de tubo de impedancias. En su investigación, miden muestras de diferentes materiales, tales como, espumas de poliuretano, fibras y corchos, en una cámara reverberante (a escala normal y con reducción de escala) y en tubo de impedancias. De los resultados que obtuvieron, puede observarse que los valores entre cámaras reverberantes son similares, mientras que con tubo de impedancia los valores en bajas y medias frecuencias son menores y en altas frecuencias son casi similares o mayores.

Lo anterior indica que el tipo de montaje, así como la incidencia de la señal sobre la muestra de cada método influye en el resultado de los coeficientes de absorción sonora.

Por otra parte, Pérez (1989) señala que:

los coeficientes de absorción obtenidos en cámara reverberante no son tan precisos como los medidos para la incidencia normal en tubo de Kundt; además el área de absorción equivalente de una muestra no es proporcional al área real debido a la difracción en los bordes de la muestra (p. 378).

Por lo anterior y por las conclusiones obtenidas durante la construcción del tubo de impedancias según Álvarez et al. (2010), en relación a la validación del mismo, se puede decir que el tubo funciona de manera adecuada y los valores obtenidos son de gran confiabilidad.

⁵⁸ El tipo de montaje A se refiere a la colocación del material contra un fondo sólido, por ejemplo un muro de tablaroca o ladrillo, sin espacios de aire entre ellos.

5.3.1.2.3. Coeficientes de absorción sonora de materiales utilizados en modelos físicos a escala

Una vez entendido y probado el método para la obtención del coeficiente de absorción mediante el tubo de impedancias, se midieron 101 muestras de distintos materiales que comúnmente se emplean en la construcción de modelos físicos a escala en el campo de la arquitectura, tales como: papeles, cartones, plásticos, metales, maderas, textiles, espumas y fibras, entre otros. La lista completa de los materiales medidos se muestra en el Anexo 4.

De las 101 muestras se seleccionaron 5 materiales con objeto de realizar una comparación mediante pruebas en un modelo físico a escala, las cuales son: MDF de 12 mm, Cartón Corrugado 2 caras de 4 mm, Corcho de 5 mm, Espuma de Poliuretano Suave tipo 24 FME y 50 RF de 12 mm cada una. El criterio de selección de los materiales se hizo de acuerdo a su grado de absorción sonora, reflejantes, medianamente absorbentes y muy absorbentes.

A continuación se muestran en gráficas los resultados obtenidos de los coeficientes de absorción sonora de los materiales seleccionados (fig. 5.49 a 5.53):

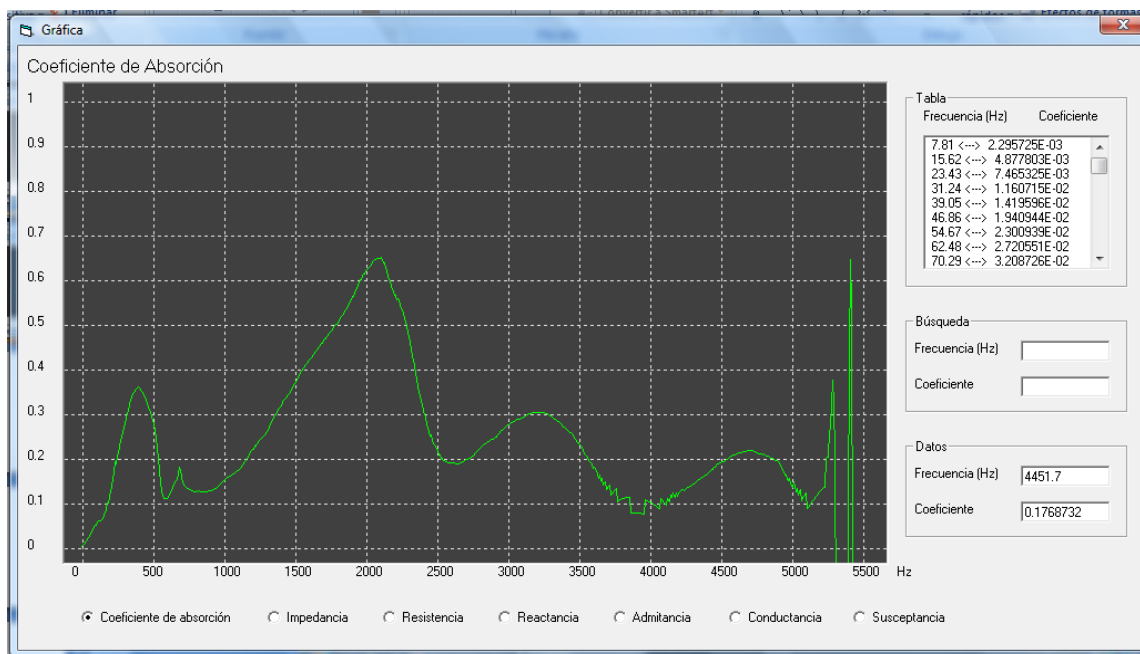


Fig. 5.49. Gráfica de coeficientes de absorción sonora MDF 12 mm (Ventana resultados en software *Medición Tubo 2.92*).

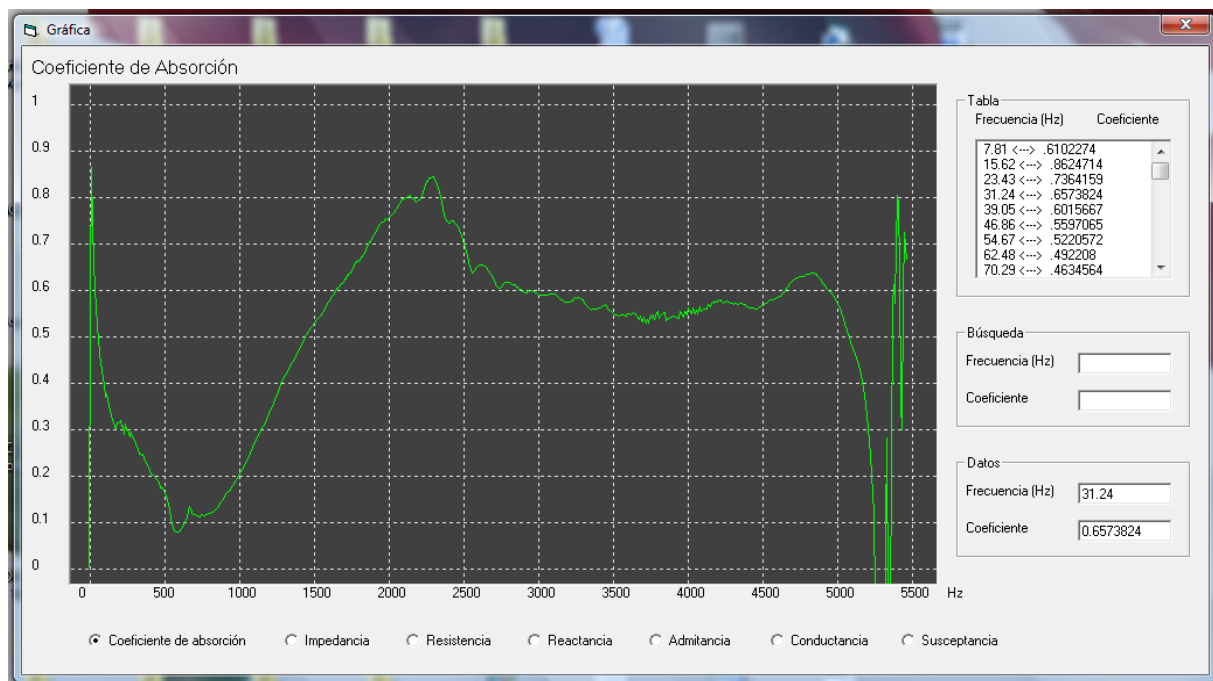


Fig. 5.50. Gráfica de coeficientes de absorción sonora Cartón Corrugado 2 caras, 4 mm (Ventana resultados en *software Medición Tubo 2.92*).

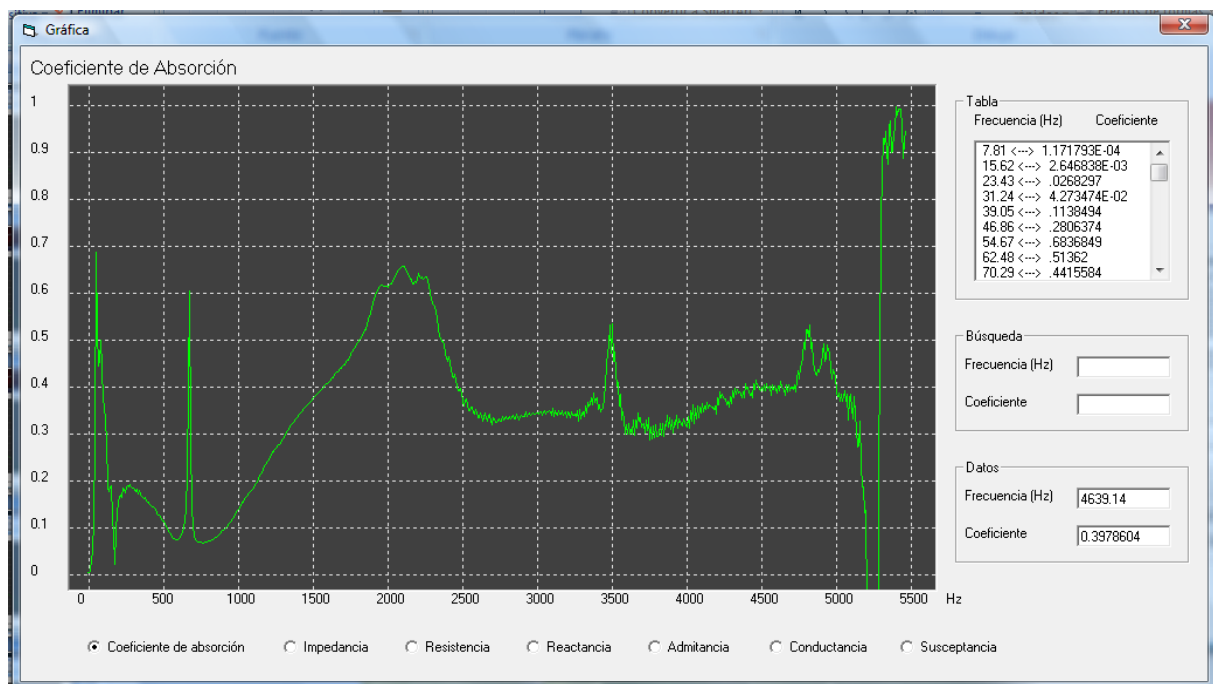


Fig. 5.51. Gráfica de coeficientes de absorción sonora Corcho 5 mm (Ventana resultados en *software Medición Tubo 2.92*).

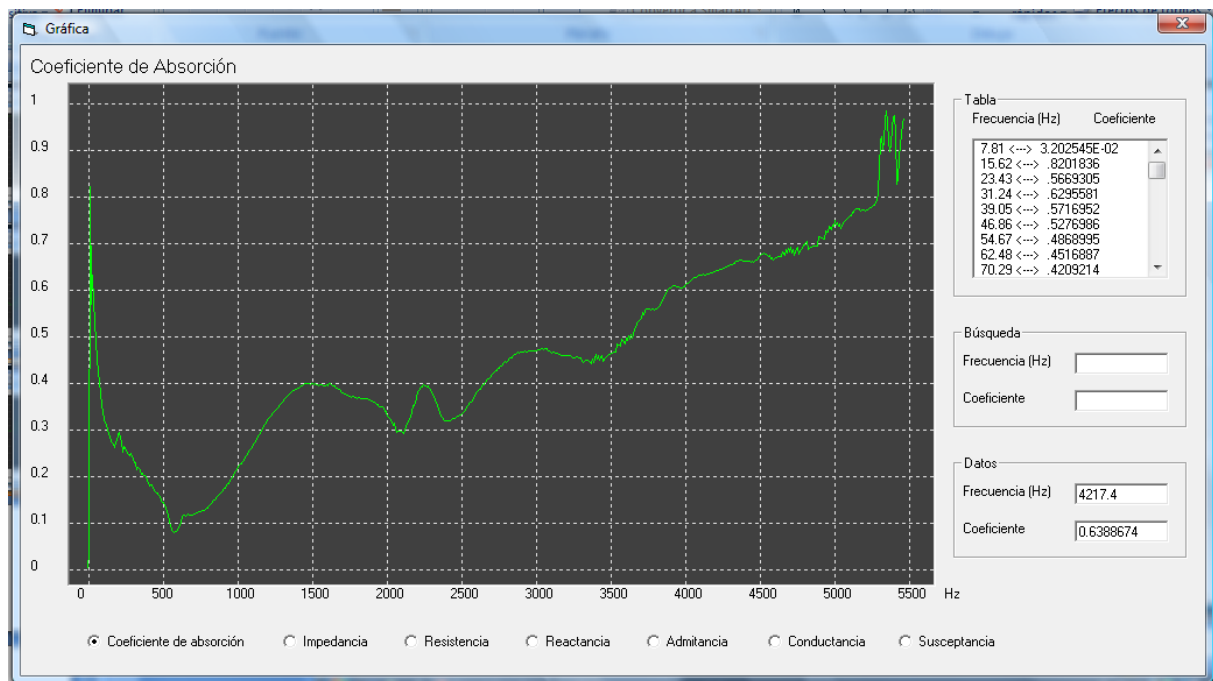


Fig. 5.52. Gráfica de coeficientes de absorción sonora Espuma de Poliuretano Suave 24 FME, 12 mm (Ventana resultados en *software Medición Tubo 2.92*).

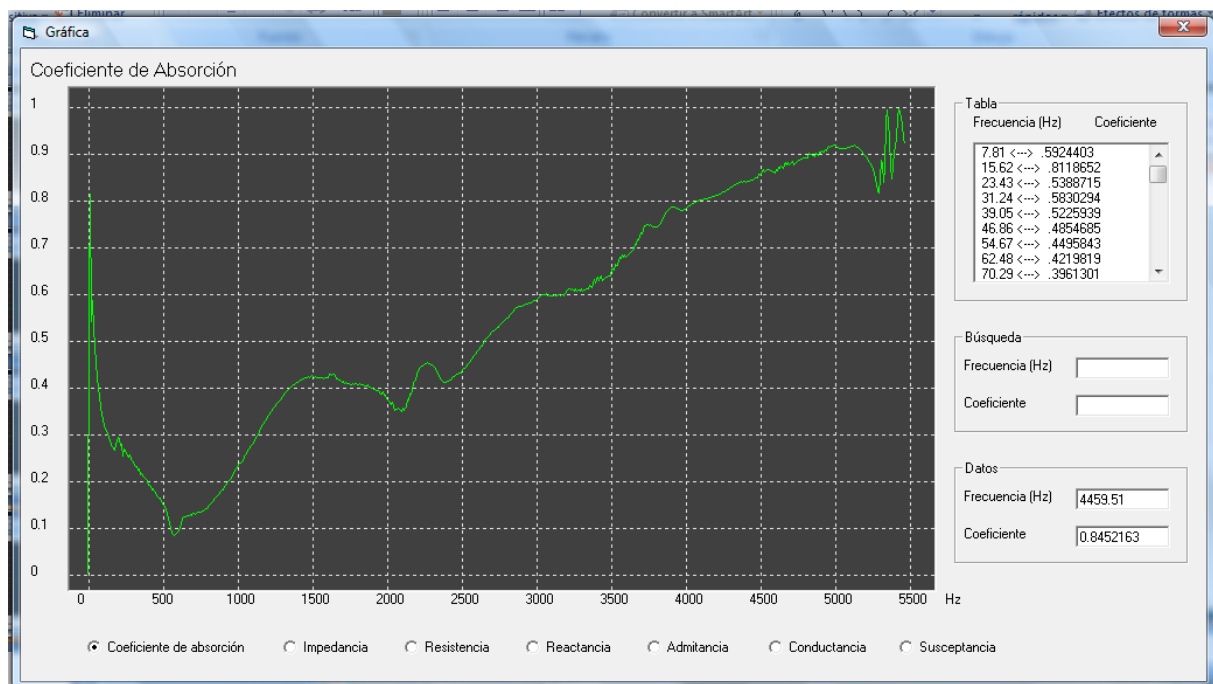


Fig. 5.53. Gráfica de coeficientes de absorción sonora Espuma de Poliuretano Suave 50 RF, 12 mm (Ventana resultados en *software Medición Tubo 2.92*).

En las gráficas (fig. 5.49 a 5.53), puede observarse que el MDF fue el material más reflejante, sobre todo en frecuencias altas, después continua el corcho y luego el cartón corrugado. Es importante señalar que estos tres materiales tuvieron un comportamiento similar entre las frecuencias de 1 750 Hz y 2 250 Hz, donde su coeficiente de absorción sonora resultó de medio a alto, dependiendo el caso. Por otro lado, las espumas tuvieron mejor absorción en frecuencias altas, mientras que en frecuencias medias y bajas su absorción fue baja.

5.3.1.2.3.1. Clasificación de resultados

Después de la medición de los materiales, se seleccionaron algunos de ellos para realizar una propuesta de clasificación de resultados, para ello, los coeficientes de absorción sonora en frecuencias altas (1 250 Hz, 2 500 Hz y 5 000 Hz) obtenidos a través del tubo de impedancias, se compararon con materiales de construcción reales (125 Hz, 250 Hz y 500 Hz), como se muestra en la tabla 5.11.

Materiales comúnmente utilizados en modelos a escala y su grado de absorción por frecuencia			Materiales comúnmente utilizados en la construcción y su grado de absorción por frecuencia			Coincidencia en frecuencias			Grado de Correlación Espectral	Coincidencia Visual
						125 Hz	250 Hz	500 Hz		
1 250 Hz	2 500 Hz	5 000 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 250 Hz	2 500 Hz	5 000 Hz		
Fabriano, 300 gramos (0.04 cm)			Persianas verticales					X	0,13	X
0,23	0,27	0,24	0,03	0,09	0,24			X	0,13	X
NRC = 0,37 (baja absorción)			Yeso acústico, clase A1					X	0,12	X
			0,04	0,09	0,24			X	0,12	X
			Madera contrachapada					X	0,02	
			0,18	0,26	0,24			X	0,02	
Papel texturizado (0.03 cm)			Yeso acústico de 2.0 cm de espesor, no inflamable, clase A1					X	0,10	X
0,22	0,32	0,34	0,05	0,18	0,34			X	0,10	X
NRC = 0,37 (baja absorción)			Panel de madera contrachapada					X	0,00	X
			0,25	0,3	0,34			X	0,00	X
			Tablero (tablex) con cámara de aire				X	X	-0,01	X
			0,26	0,32	0,34		X	X	-0,01	X
Cartulina Couche, 200 gramos (0.01 cm)			Placa de lana mineral					X	-0,01	
0,22	0,22	0,31	0,19	0,27	0,31			X	-0,01	
NRC = 0,36 (baja absorción)			Espuma de resina de melamina					X	0,07	
			0,09	0,15	0,31			X	0,07	
			Feligreses en bancos de una iglesia					X	0,00	X
			0,2	0,25	0,31			X	0,00	X
Ilustración corrugado, 2 caras (0.15 cm)			Butaca tapizada					X	0,03	X
0,23	0,27	0,25	0,2	0,2	0,25			X	0,03	X
NRC = 0,38 (baja absorción)			Tablero (tablex) duro					X	0,04	X
			0,18	0,2	0,25			X	0,04	X
Batería (0.25 cm)			Placa de lana mineral					X	0,00	X
0,28	0,19	0,31	0,19	0,27	0,31			X	0,00	X
NRC = 0,37 (baja absorción)			Espuma de resina de melamina					X	0,08	
			0,09	0,15	0,31			X	0,08	
			Feligreses en bancos de una iglesia					X	0,01	X
			0,2	0,25	0,31			X	0,01	X
Cartón corrugado, 2 caras, 565 gramos (0.4 cm)			Asientos ligeramente tapizados					X	0,08	X
0,37	0,71	0,57	0,36	0,47	0,57			X	0,08	X
NRC = 0,65 (media absorción)			Fibra absorbente (fibra mineral presionada)					X	0,08	X
			0,31	0,54	0,57			X	0,08	X
			Paneles y baldosas con textura rugosa					X	-0,08	X
			0,56	0,76	0,57			X	-0,08	X
Mampara foamboard (0.5 cm)			Cortina de algodón de 340 g/m2, fruncida al 175%				X	X	0,07	
0,25	0,23	0,4	0,04	0,23	0,4		X	X	0,07	
NRC = 0,38 (baja absorción)			Suelo (tierra/grava) suelto y húmedo de 20 cm de grosor					X	0,03	
			0,15	0,25	0,4			X	0,03	
			Lana mineral de 0.35 cm de espesor					X	-0,06	X
			0,28	0,37	0,4			X	-0,06	X

Tabla 5.11 continua en la siguiente hoja



Corcho (0.5 cm) 0,28 0,31 0,35 NRC = 0,42 (media absorción)	Espectador en asiento de madera					X	0,06	X
	0,15	0,25	0,35					
	Pared de baldosa perforada, con 5 cm de lana mineral + 50 cm de cámara de aire							
	0,5	0,41	0,35			X	-0,11	X
MDF (1.2 cm) 0,26 0,27 0,17 NRC = 0,41 (media absorción)	Tapices de lana							
	0,2	0,25	0,35			X	0,05	X
	Panel de madera contrachapada de 1 cm de espesor (3/8")							
	0,28	0,22	0,17			X	0,01	X
Madera balsa, 1/4" (0,64 cm) 0,21 0,15 0,3 NRC = 0,36 (baja absorción)	Bloques de concreto							
	0,3	0,45	0,3			X	-0,13	
	Revestimiento de yeso							
	0,24	0,27	0,3			X	-0,05	
Acrílico (0.3 cm) 0,2 0,14 0,05 NRC = 0,30 (baja absorción)	Panel de fibra con 2.5 cm de espacio de aire							
	0,3	0,3	0,3			X	-0,08	X
	Doble acristalamiento con vidrio de 2 a 3 mm de espesor con 1.0 cm de separación entre ellos							
	0,1	0,07	0,05			X	0,06	X
Terciopelo, pelo largo (0.5 cm) 0,3 0,25 0,37 NRC = 0,38 (baja absorción)	Placas de yeso sobre bastidor. Placas de 0,95 cm y 10.0 cm de espacio vacío							
	0,11	0,13	0,05			X	0,03	
	Tablero de yeso de 1.3 cm con cámara de aire							
	0,29	0,1	0,05			X	-0,02	
Fieltro (0.4 cm) 0,28 0,27 0,35 NRC = 0,38 (baja absorción)	Alfombra de 0.3 cm de espesor sobre fieltro, encima de concreto							
	0,11	0,14	0,37			X	0,10	X
	Público (persona)							
	0,3	0,32	0,37	X		X	-0,02	X
Espuma de poliuretano suave, tipo 24 FME (1.2 cm) 0,39 0,38 0,76 NRC = 0,42 (media absorción)	Tapices de lana							
	0,2	0,25	0,35			X	0,03	X
	Yeso acústico de 6.8 cm de grosor							
	0,47	0,74	0,76			X	-0,15	
Espuma de poliuretano suave, tipo 50 RF (1.2 cm) 0,56 0,89 0,76 NRC = 0,81 (alta absorción)	Silla ligeramente acolchada, ocupada							
	0,53	0,63	0,76			X	-0,13	X
	Cortina de tela							
	0,08	0,39	0,76			X	0,10	X
	Espuma de resina de melamina							
	0,11	0,35	0,76			X	0,10	X
	Yeso acústico de 6.8 cm de grosor							
	0,47	0,74	0,76			X	0,08	
	Silla ligeramente acolchada, ocupada							
	0,53	0,63	0,76			X	0,10	X

Tabla 5.11. Coeficientes de absorción sonora de materiales comúnmente utilizados en modelos a escala.

Los grados de absorción se determinaron siguiendo el procedimiento para la obtención del NRC⁵⁹, pero en este caso las frecuencias tomadas en cuenta fueron 1 600 Hz, 2 000 Hz, 2 500 Hz y 3 200 Hz, que son las frecuencias centrales en esta investigación.

Se asignaron límites para cada grupo de acuerdo a su grado de absorción: de 0 a 0.4 para materiales de baja absorción, de 0.41 a 0.8 para materiales de media absorción y de 0.81 a 1.0 para materiales altamente absorbentes.

La comparación entre los materiales a escala y los reales se realizó teniendo en cuenta el siguiente procedimiento: en primer lugar se seleccionaron materiales cuyos coeficientes de absorción se compararan en la frecuencia de 5 000 Hz con la frecuencia de 500 Hz para materiales reales, donde los coeficientes de la frecuencia alta corresponden a los obtenidos en las mediciones y los de las frecuencias medias corresponden a una base de datos internacional (PTB⁶⁰, 2006). Después de esta comparación se hizo otra selección, donde se descartaron materiales considerados arquitectónicamente no significativos para ser empleados en un modelo a escala. Por último se realizó un promedio de los coeficientes de absorción de ambos materiales (a escala y real) y como resultado se obtuvo un número que aparece en la columna con el título de *Grado de Correlación Espectral*, el cual nos dará una idea de la diferencia del espectro de ambos materiales, por lo que: si se obtiene un número negativo significa que el material real es más absorbente que el utilizado en un modelo físico a escala.

En la tabla 5.11 se puede observar otra columna con el título de *Coincidencia Visual*, la cual dará información acerca de la correlación visual entre el material real y el del modelo físico a escala.

⁵⁹ El Coeficiente de Reducción Sonora (NRC, por sus siglas en inglés), es la media aritmética de los coeficientes de absorción sonora medidos en las bandas de octava de 250, 500, 1 000 y 2 000 Hz.

⁶⁰ <http://es.scribd.com/doc/24061195/abstab-wf>. Página consultada en 2011.

5.3.2. Etapa 2 – Comprobación de los coeficientes de absorción sonora de algunos materiales mediante un experimento en un caso de estudio, utilizando un modelo físico a escala

Como se mencionó en el Capítulo 1, los modelos físicos a escala, desde el campo de la acústica arquitectónica, se han utilizado para la predicción de la calidad acústica de los espacios, por otra parte también se han empleado para investigar la influencia de la absorción de los materiales en casos específicos, como son la audiencia en salas de concierto y las butacas (M. Barron and S. Coleman. *Measurements of the Absorption by Auditorium Seating – a Model Study*. 2000) en el comportamiento acústico de los recintos. Cabe mencionar que el método más común, empleado para la obtención de los coeficientes de absorción de los materiales, ha sido el de incidencia aleatoria en una cámara reverberante (ver en Capítulo 4). Sin embargo la absorción sonora de los materiales que se emplean en la construcción de modelos arquitectónicos a escala se desconoce aún.

Por lo anterior, se propuso comprobar los coeficientes de absorción sonora de materiales utilizados en modelos físicos a escala obtenidos mediante el método de incidencia normal en tubo de impedancia, en un modelo físico a escala que simulara un espacio común.

La comprobación en el modelo se llevó a cabo mediante la aplicación de materiales al mismo y posteriormente mediante la medición del tiempo de reverberación.

5.3.2.1. Modelo físico a escala

5.3.2.1.1. Descripción del caso de estudio

Como se mencionó en el Capítulo 2, el fenómeno de resonancia dentro de un espacio o los modos propios de un espacio dependen esencialmente de la forma, el tamaño del local y del grado de absorción de las superficies.

Egan (1988) recomienda realizar una adecuada relación de las dimensiones del espacio para prevenir el fenómeno de resonancia dentro de éste y distribuir de manera uniforme la energía del sonido, sobre todo en frecuencias bajas. También menciona que el fenómeno de resonancia

ocurre comúnmente en recintos de pequeñas dimensiones con superficies reflejantes. Por otra parte, Everest y Pohlmann (2009, p. 331), mencionan que en cuanto mayor sea un espacio, mejor será la calidad del sonido dentro de éste.

Tomando en cuenta lo anterior, en esta fase del experimento se buscaron las proporciones óptimas, así como la configuración y forma del espacio a construir a partir del estudio de los modos propios de vibración del mismo, también se examinaron las características de las superficies para el espacio propuesto.

5.3.2.1.1.1. Proporción y volumen del espacio

El primer aspecto importante a definir, fue la forma y proporción del espacio. En este caso, se propuso un espacio en forma de paralelepípedo con proporciones que se ubicaran dentro de la gráfica de *Bolt* (Fig. 5.55) (Carrión, 1998, p. 58). En esta gráfica se señala una zona limitada en relación a la longitud y anchura del espacio que se sugiere para obtener dimensiones ideales. Es importante mencionar que las proporciones van en función de la altura con proporción de 1.

Tomando como base el modelo físico a escala propuesto por Garay (2010), se modificaron algunas proporciones y se analizaron en relación a la gráfica de *Bolt*. Las dimensiones sugeridas fueron: 4.2 m de altura, 8.7 m de longitud y 6.3 m de anchura, en escala 1:1, por lo que en escala 1:10, corresponden a: 42 cm de altura, 87 cm de longitud y 63 cm de anchura, así las proporciones son 1.05: 2.175: 1.575.

Como se observa en la figura 5.54, las proporciones resultantes quedan dentro del perímetro de la gráfica, lo que supone uniformidad en el campo sonoro del espacio y la evasión en lo más posible del fenómeno de resonancia.

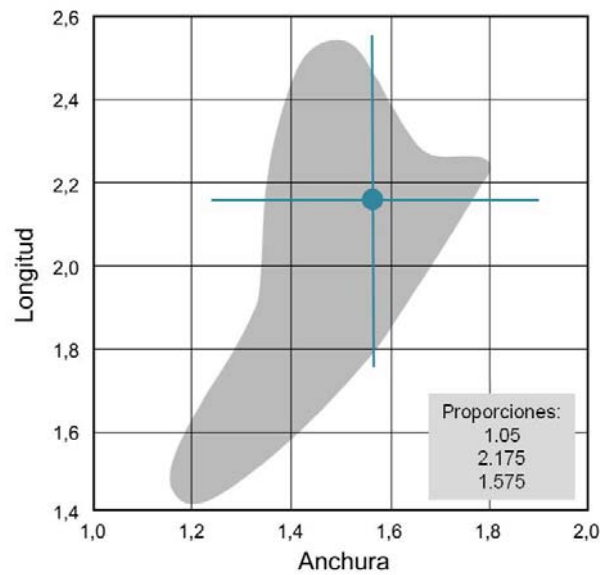


Fig. 5.54. Proporciones resultantes para el modelo físico a escala. (Adaptada de: Carrión, 1998, p. 58)

En relación al volumen del espacio, Everest y Pohlmann (2009, p. 331), mencionan que un espacio con un volumen menor a 42.45 m^3 es muy propenso a presentar problemas de coloración y resonancia dentro del mismo (en escala 1:10 sería igual a 0.4245 m^3). En este caso, se tiene un volumen de 0.230202 m^3 en escala 1:10 (230.0202 m^3 en escala 1:1), lo que supone un volumen adecuado por ser superior a lo indicado (fig. 5.55).

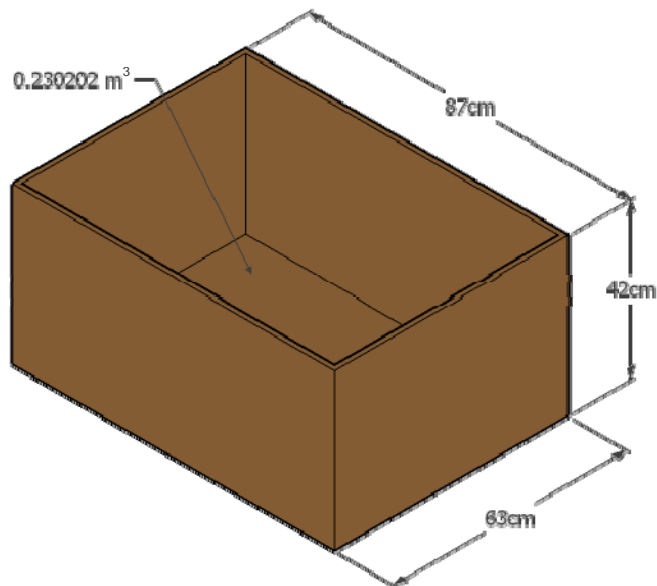


Fig. 5.55. Proporciones y volumen del espacio propuesto.

5.3.2.1.1.2. Modos propios de vibración

Otro aspecto importante a estudiar fueron los modos propios de vibración del espacio, los cuales como ya se ha mencionado, dependen fundamentalmente de la forma, el tamaño del local y del grado de absorción de las superficies. Llinares et al. (2008), mencionan que “todas las salas, cualquiera que sea su forma, poseen unas frecuencias propias de vibración que les son características y que se explican por la formación de ondas estacionarias dentro del recinto” (p. 154).

En el Capítulo 2, se explicó que sólo cuando se trata de espacios en forma de paralelepípedo y con superficies totalmente reflectantes, es posible calcular los modos propios de espacio a partir de la fórmula de Rayleigh (ecuación 5.5):

$$f_{k,m,n} = 172,5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (\text{ec.5.5})$$

donde, **172.5** es la mitad de la velocidad del sonido, **L_x**, **L_y** y **L_z** son las dimensiones de la sala en metros, **k**, **m**, **n** son valores enteros (0, 1, 2, 3, etc.).

Para el estudio de los modos propios, se aplicó la fórmula de Rayleigh en una base de datos proporcionada por Garay (2010) (Anexo 5), la cual dio como resultado una distribución de frecuencias relativamente uniforme para el espacio propuesto, como se muestra en la figura 5.56.

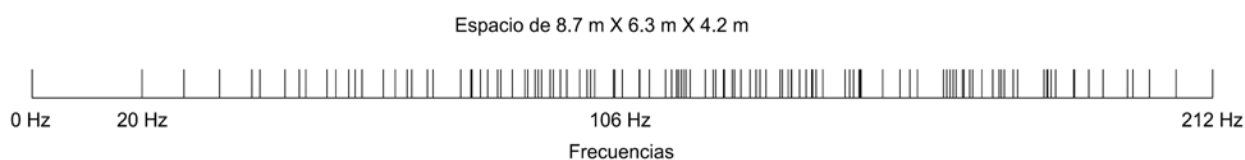


Fig. 5.56. Modos propios del espacio propuesto.

En el Capítulo 2, en la figura 2.22, se muestra un ejemplo de la distribución de los modos propios de un espacio con dimensiones iguales en todos sus lados, siendo más susceptible a la concentración de algunas frecuencias.

5.3.2.1.1.3. Selección de materiales

En la sección 5.3.1.2.3, se mencionan los 5 materiales seleccionados para su comprobación en el modelo a escala, entre ellos están: MDF de 12 mm, Cartón Corrugado 2 caras de 4 mm, Corcho de 5 mm, Espuma de Poliuretano Suave tipo 24 FME y 50 RF de 12 mm cada una (fig. 5.57). Es importante aclarar que el MDF fue el elemento base con el que construyó el modelo a escala y los demás fueron elementos sobrepuestos.



Fig. 5.57. Materiales seleccionados para su comprobación en el modelo a escala: (a) MDF, (b) Cartón Corrugado, (c) Corcho, (d) Espuma de Poliuretano Suave 24 FME y (e) Espuma de Poliuretano Suave 50 RF.

5.3.2.1.1.4. Construcción del modelo físico a escala

Después de haber definido los parámetros anteriores, se fabricó el modelo físico a escala. Primero se cortaron a la medida las piezas que componen el modelo, por lo que se recurrió al apoyo del Taller de Maderas de la UAM-Azc., como se observa en la figura 5.58.



Fig. 5.58. Corte de piezas del modelo.

Después se ensamblaron todas piezas en el Taller de Maquetas de la UAM-Azc., (fig. 5.59).



Fig. 5.59. Ensamble de piezas.

Paralelo al proceso de ensamble, se realizaron dos orificios en una de las caras del modelo para introducir los cables de la fuente y el micrófono (fig. 5.60). Dichos orificios se sellaron con hule al momento de realizar las mediciones.



Fig. 5.60. Perforación de orificios.

Por último se colocaron tiras de hule auto adherible en los cantos de las piezas que recibirían la tapa, y así garantizar un buen sellado para evitar fugas y ruido del exterior (fig. 5.61).



Fig. 5.61. Sellado de la tapa.

5.3.2.2. Normatividad aplicable

Para esta etapa del experimento se aplicó la Norma **ISO 3382** “*Acoustic – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*”, en la cual según la

*International Organization for Standardization*⁶¹ se especifican los métodos para la medición del tiempo de reverberación en espacios comunes, tales como, auditorios, salas de concierto, espacios destinados al habla y música o donde la protección contra el ruido sea necesaria.

Los métodos sugeridos son el de Respuesta al Impulso y Ruido Interrumpido. El primero según la norma, es un método que emplea una función de tiempo en relación a la presión sonora recibida en un espacio a consecuencia de la excitación de sonidos cortos transitorios como un disparo o una señal convertida en impulsos, como puede ser a partir de un generador de funciones. El segundo se refiere a la obtención de curvas de decaimiento a partir del análisis de la señal recibida y grabada del decaimiento del nivel de presión sonora después de haber excitado un espacio con ruido de banda ancha⁶². Para este segundo método, se sugiere que la duración de la excitación en el espacio sea suficiente para cubrirlo completamente antes de permitir su decaimiento. Para espacios grandes, se recomienda que la excitación dure algunos segundos.

En la norma se describe el procedimiento de medición, el equipo e instrumentación necesaria, el número de posiciones sugeridas para una cobertura adecuada en el espacio y el método para evaluar los datos obtenidos.

Menciona que los resultados obtenidos pueden ser utilizados para la corrección de otras medidas acústicas, tales como, nivel de presión sonora⁶³, eficiencia lateral⁶⁴, correlación cruzada interaural⁶⁵, aislamiento acústico, nivel de ruido de fondo y para la comparación con otros requerimientos en relación al tiempo de reverberación en los espacios.

⁶¹ La ISO u Organización Internacional de Normalización, es un desarrollador de normas internacionales. ISO ha desarrollado más de 18 500 normas con diversidad de temas, tales como comercio y comunicación para todas las ramas internacionales (excepto electrónica y la eléctrica) entre otras.

⁶² El ruido en banda ancha es una señal de ruido que tiene una respuesta en frecuencias definidas, pero que pueden estar limitadas por medio de un filtro. Una señal de ruido con estas características, puede ser una señal de ruido blanco (ruido aleatorio), rosa (ruido plano), banda limitada u otra señal con un espectro de potencia.

⁶³ Es la forma de expresar la magnitud del campo sonoro. El nivel de presión sonora (SPL, por sus siglas en inglés) se obtiene de la suma de la presión atmosférica y de la presión de las ondas. La unidad utilizada es el decibel (dB). (Carrión, 1998)

⁶⁴ Es la relación de la energía que llega lateralmente al receptor dentro de los primeros 80 ms como las primeras reflexiones (LFC, por sus siglas en inglés). (Carrión, 1998)

⁶⁵ Es la diferencia y correlación de señales o primeras reflexiones que llegan a ambos oídos del receptor (IACC, por sus siglas en inglés). (Carrión, 1998)

La aplicación de esta norma en esta fase del experimento, se debe a que ésta considera a la medición del tiempo de reverberación como un indicador predominante y significativo por sus propiedades acústicas, pues describe la cualidad y calidad acústica de los espacios.

5.3.2.2.1. Equipo e instrumentación requeridos

La norma describe la instrumentación necesaria para realizar las mediciones y que son:

Fuente sonora

La norma especifica el uso de una fuente sonora, la cual debe ser lo más omnidireccional posible y debe producir un nivel de presión sonora suficiente para generar curvas de decaimiento sin que se produzca contaminación de ruido de fondo.

En este caso, como fuente de excitación para el modelo a escala, se utilizó una fuente en miniatura (fig. 5.62), la cual se ha utilizado anteriormente como fuente sonora en los modelos físicos a escala fabricados en el LADAc (González, 2009 y Garay, 2010) y está diseñada en base a estudios documentados de K. Oguchi (2003 y 2007).



Fig. 5.62. Fuente en miniatura.

Micrófonos

La norma recomienda la utilización de micrófonos omnidireccionales⁶⁶. Estos deben ser lo más pequeños posibles y preferentemente deben tener un diafragma máximo de 13 mm. Micrófonos hasta de 26 mm son aceptados, siempre y cuando sean de los siguientes tipos: de respuesta de presión y de campo libre, con la cualidad de incidencia aleatoria⁶⁷.

Se utilizó un micrófono para campo libre de 1/4" tipo 40BF de la marca G.R.A.S. (fig. 5.63). Su tamaño lo hace adecuado para mediciones en modelos a escala. Por otra parte, se utilizó un preamplificador para micrófono de 1/4" G.R.A.S, el cual modulará, amplificará y enviará la señal al analizador.



Fig. 5.63. Micrófono para campo libre de 1/4" G.R.A.S., tipo 40BF. (Imagen tomada del manual de G.R.A.S)

Grabadora y aparato que forme el decaimiento del nivel registrado

En la norma se sugiere la utilización de una grabadora, en este caso el aparato que funcionó como grabador y procesador de la señal fue el NOR 840, descrito en la sección 5.3.1.1.1. *Equipo e instrumentación requeridos*. El analizador se empleó para obtener los resultados del tiempo de reverberación (decaimiento de la señal) del modelo a escala. El ruido generado fue filtrado, lo que quiere decir que se eliminó parte del espectro que no estaba comprendido entre las frecuencias que se deseaban medir.

⁶⁶ Los micrófonos omnidireccionales son aquellos que poseen igualdad en su respuesta a la sensibilidad, esto es, que captan los sonidos desde cualquier ángulo de incidencia.

⁶⁷ Se refiere a cuando las ondas acústicas llegan desde todas las direcciones.

5.3.2.3. Cálculo del tiempo de reverberación

En esta fase del experimento fue necesaria la creación de un *software* que controlara al analizador NOR 840 a partir de una computadora, para realizar la medición del tiempo de reverberación, como se hizo en el caso de la obtención del coeficiente de absorción.

Lo anterior, debido a que en tesis de maestría anteriores (González, 2009 y Garay, 2010), el proceso de obtención de datos del analizador demandó un tiempo considerable, pues la única forma de extraerlos era a partir de la grabación de ellos en un *diskette* de 3 ½" por cada medición. Por ello que se solicitó la ayuda del Ing. Federico Furlán⁶⁸ para el desarrollo de dicha interfaz.

La interfaz fue diseñada en el *software Visual Basic* y es compatible con un sistema operativo de *Windows*, XP o Vista. Al *software* se le dio el nombre de *RT*.

Al igual que el *software Medición Tubo 2.92*, su función es mandar instrucciones desde la computadora al analizador para realizar la medición. Una vez realizada la medición, el analizador recoge la señal recibida por el micrófono para su procesamiento y determinación del tiempo de reverberación por frecuencia. Posteriormente el analizador envía los datos a la computadora para su manipulación (archivos .txt.).

5.3.2.3.1. Descripción del funcionamiento del software RT

La figura 5.64, muestra la ventana de inicio del *software*, la cual contiene tres menús principales: *Inicio*, *Configurar* y *Consultar*. En la parte central de la ventana puede observarse un espacio de *Información*, en el cual puede consultarse el estado de los micrófonos y de la medición. Y a un costado de este espacio se observan dos opciones, *Iniciar Medición* y *Activar* el generador de ruido.

⁶⁸ Ingeniero en Mecatrónica. Miembro del grupo de alumnos que participaron en la construcción del tubo de impedancias y en el desarrollo del *software (Medición Tubo 2.92)*.

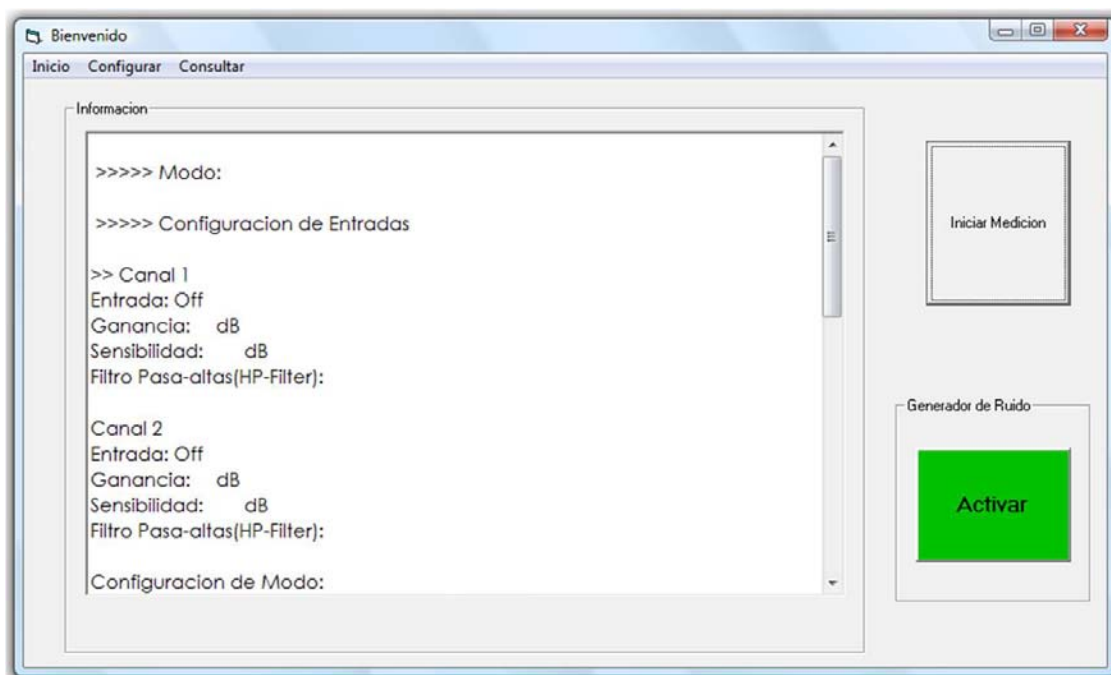


Fig. 5.64. Ventana de Inicio del *software RT*.

En el menú de *Inicio* se puede seleccionar el modo de medición (sencillo o multiespectro) o salir de la aplicación (fig. 5.65).

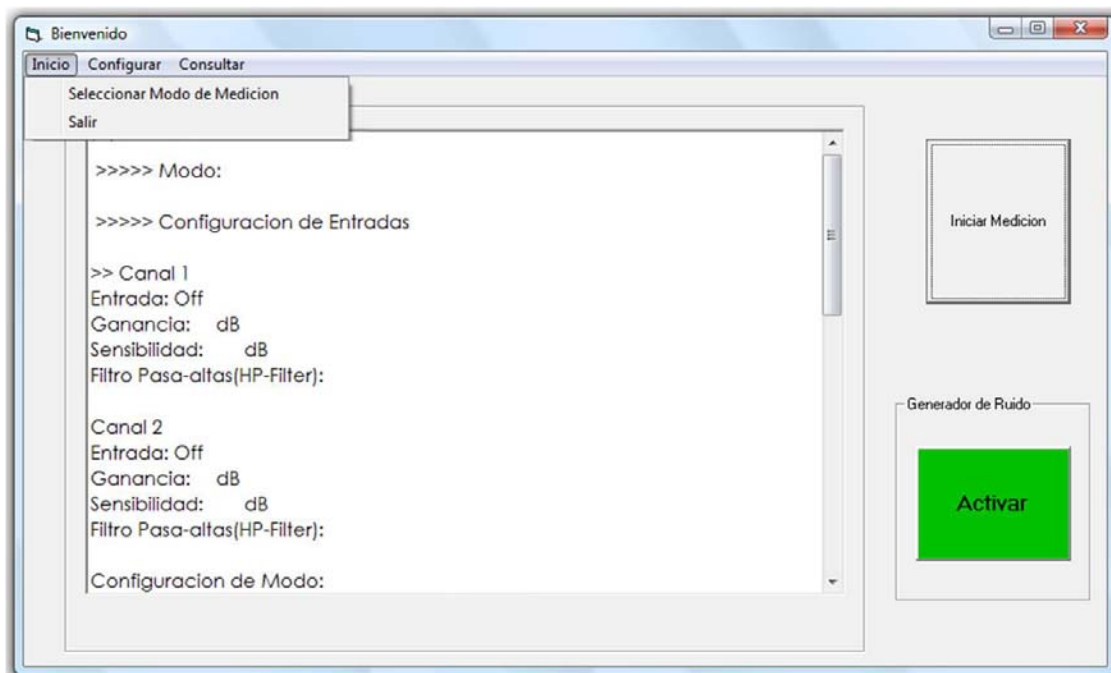


Fig. 5.65. Menú *Inicio*.

En el menú de *Configurar* se cuentan con cuatro opciones: *Configuración de Entradas* es donde se especifica si se trabaja con uno o dos micrófonos, así como cuál será la ganancia en dB's de los mismos; en *Configuración de la Medición*, se establecen los parámetros de la medición, tales como, frecuencias en las que se medirá, tiempo que durará la excitación de la fuente y tipo de señal que será recibida; *Configuración de Disparo* se refiere al momento en que los micrófonos comenzarán a medir y se puede seleccionar que sea de forma manual o cuando se apague el ruido y por último en *Configuración de Generador de Ruido* se establece que tipo de señal se generará, el nivel de atenuación y en que frecuencias se emitirá dicha señal (fig. 5.66).

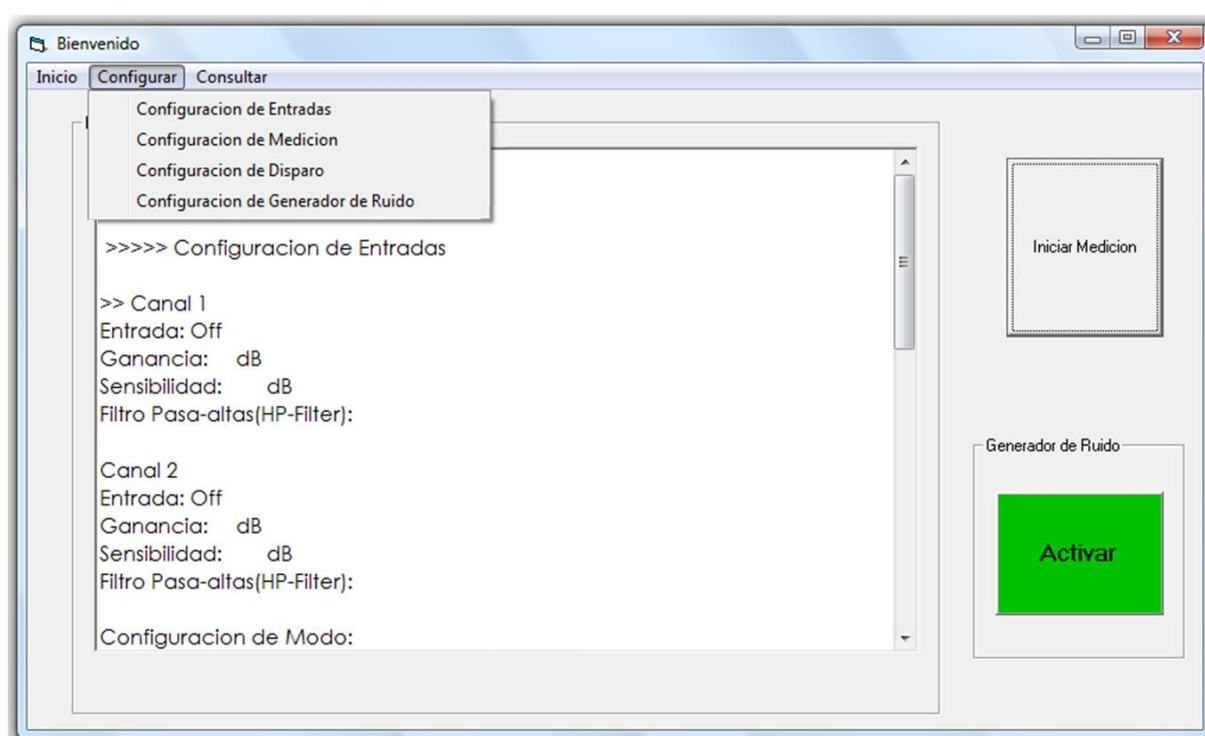


Fig. 5.66. Menú *Configurar*.

En el menú *Consultar* pueden visualizarse las mediciones por frecuencia en una lista, las cuales pueden exportarse a una carpeta en formato .txt., (fig. 5.67).

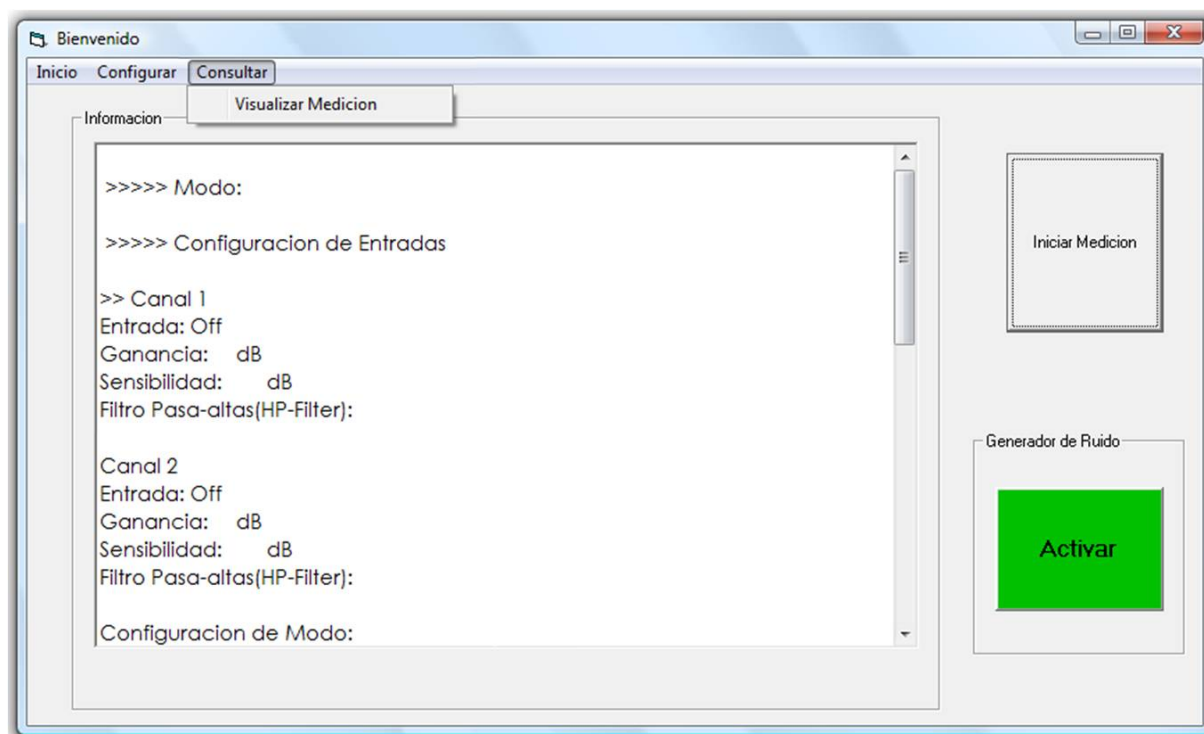
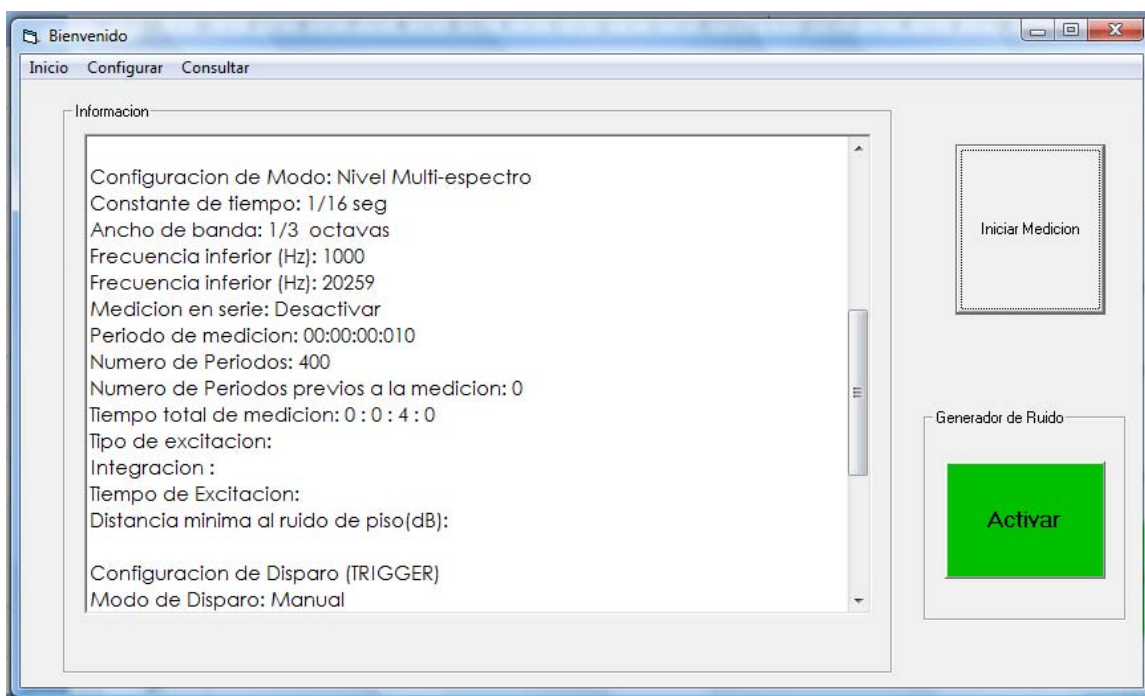
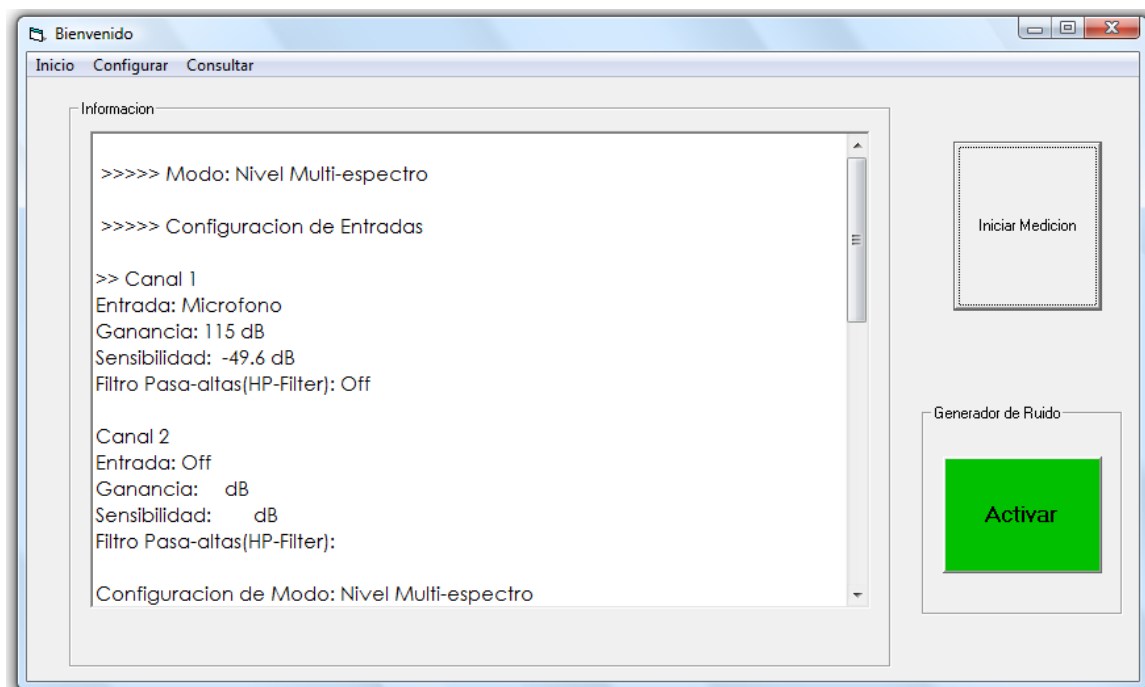


Fig. 5.67. Menú *Consultar*.

Así por ejemplo, para realizar la medición del tiempo de reverberación en el modelo a escala, se configuró el *software* como se explica a continuación: Primero se seleccionó el modo de medición en multiespectro, luego se eligió solo un micrófono para medir, al cual se le estableció un nivel de ganancia en 90 dB. Después se estipuló medir en tercios de octava desde la frecuencia de 1 000 Hz a 20 000 Hz, definiendo una sola frecuencia por medición. Se excitó la fuente durante cuatro segundos con ruido filtrado y se determinó comenzar la medición del decaimiento de la señal, cada vez que ésta se apagara.

Las figuras 5.68 a 5.70, muestran un resumen de la configuración final de la medición en la pantalla de inicio.



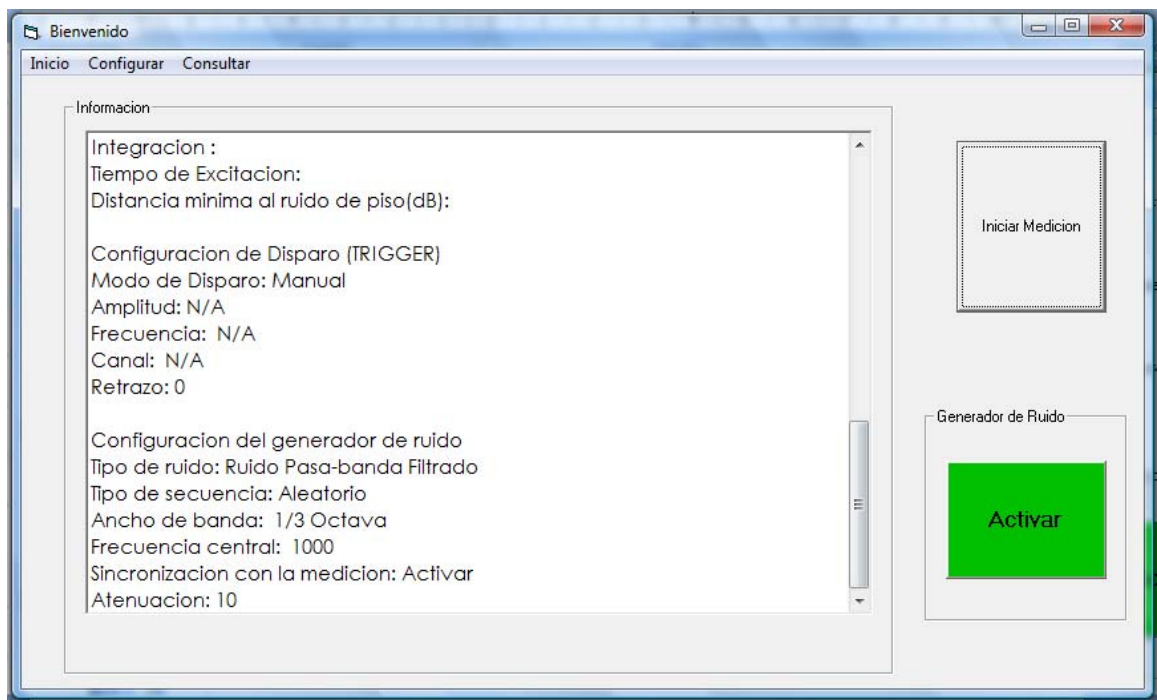


Fig. 5.68 a 5.70. Configuración de la medición.

Una vez realizada la medición, se obtienen los resultados, tales como, tiempo de reverberación y decaimiento de la señal en formato .txt., para su manipulación (fig. 5.71).

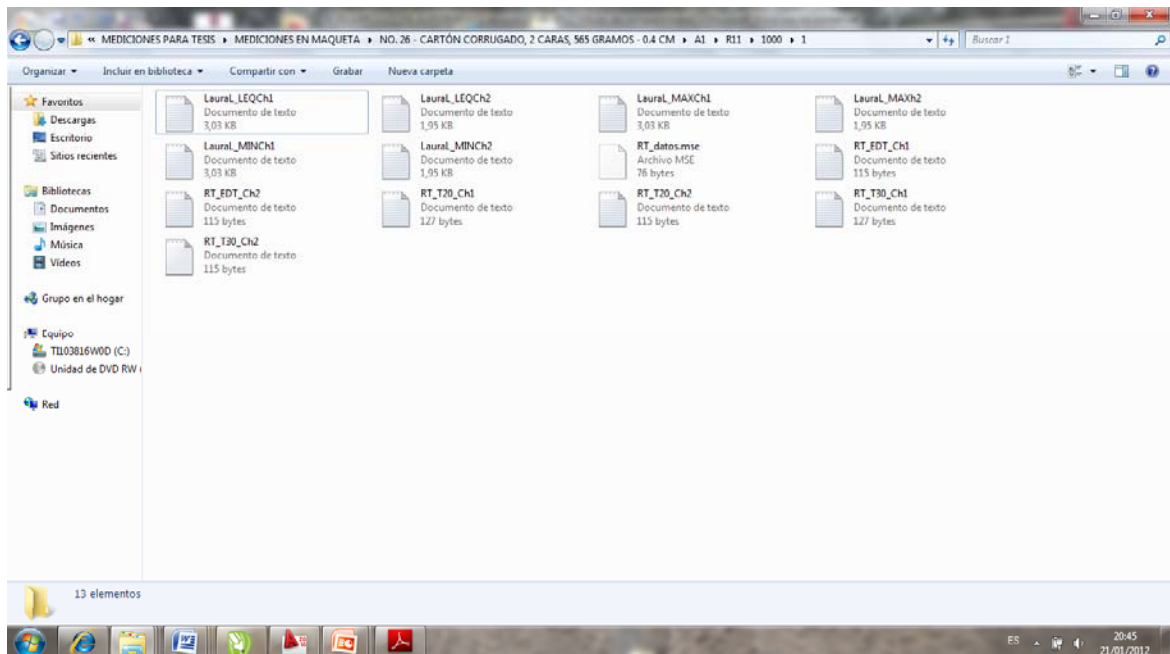


Fig. 5.71. Resultados en formato .txt.

5.3.2.3.2. Proceso de medición

El método empleado en esta fase del experimento fue el de ruido interrumpido, pues la norma señala que el de respuesta al impulso requiere de instrumentación más sofisticada, además de convenir más cuando se miden otros parámetros acústicos que se derivan del tiempo de reverberación.

En esta etapa del experimento se realizó la caracterización de la fuente en miniatura para comprobar que su respuesta continuara siendo la misma, además de ingresar su comportamiento en el programa de simulación acústica *CATT-Acoustics V8*, utilizado para la simulación por computadora. También se definió la ubicación de la fuente y el micrófono, así como el número de mediciones según lo establecido en la Norma ISO 3382.

El proceso de caracterización de la fuente en miniatura se describe en el Anexo 6, tomando como referencia el proceso de la Norma ISO 3382 (1997) y Garay (2010).

Después se determinaron los puntos de medición en el modelo a escala, para ello primero se definió la distancia entre la fuente y el micrófono, por lo que se tomó como referencia lo establecido en la Norma ISO 3382, donde especifica que el micrófono no debe estar muy cerca de la fuente sonora, para evitar la influencia de sonido directo.

La distancia mínima entre la fuente y el micrófono puede calcularse a partir de la ecuación 5.6.

$$d_{\min} = 2\sqrt{V/cT} \quad (\text{ec.5.6})$$

donde, V es el volumen del espacio en metros cúbicos (230.202 m³), c es la velocidad del sonido en metros por segundo (344 m/s) y T es una estimación del tiempo de reverberación en segundos (1.59 s).

Sustituyendo datos en la ecuación 5.6, se tiene:

$$d_{\min} = 2\sqrt{230.202 \text{ m}^3 / (344 \text{ m/s})(1.59 \text{ s})}$$

$$d_{\min} = 1.30 \text{ m}$$

El resultado obtenido, hace referencia al espacio a escala real, por lo que a escala 1:10, la distancia mínima entre la fuente y el micrófono para evitar influencia del sonido directo es de 0.13 m, o sea, 13 cm.

Una vez determinada la distancia mínima entre la fuente y el micrófono, se plantearon los puntos de medición. En relación a esto, la norma señala que el número de posiciones de los micrófonos va en función a la cobertura requerida del espacio.

Primero se restaron 10 cm de cada lado, pues en la norma se señala que la distancia mínima entre el micrófono y las superficies reflejantes más cercanas, incluida el suelo, debe ser de por lo menos 1/4 de la longitud de onda, normalmente 1m, que en escala 1:10 son 10 cm. Después se buscó el número de veces que la distancia mínima entre la fuente y el micrófono cupieran en sentido transversal y longitudinal del modelo a escala.

Al final se obtuvieron 12 puntos de medición con un rango de cobertura bastante amplio, evitando la influencia del sonido directo de la fuente al micrófono. En la figura 5.72, se observa la ubicación y distancia (expresada en metros) entre los puntos de medición en el modelo.

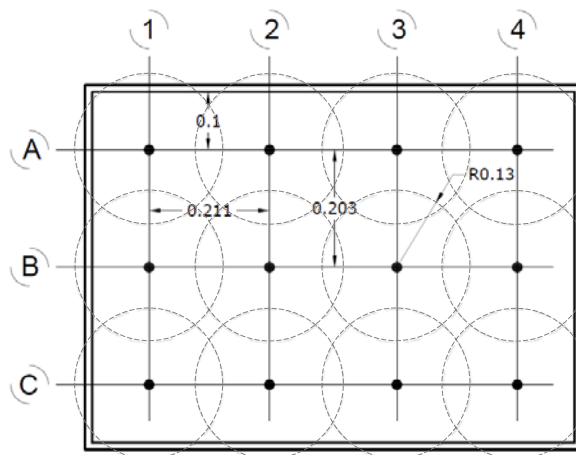


Fig. 5.72. Posición de las mediciones y rango de cobertura.

Para efectuar las mediciones, se decidió colocar cada uno de los 4 materiales seleccionados anteriormente en una de las caras laterales del modelo, además del material base (MDF), como se observa de las figuras 5.73 a 5.77.

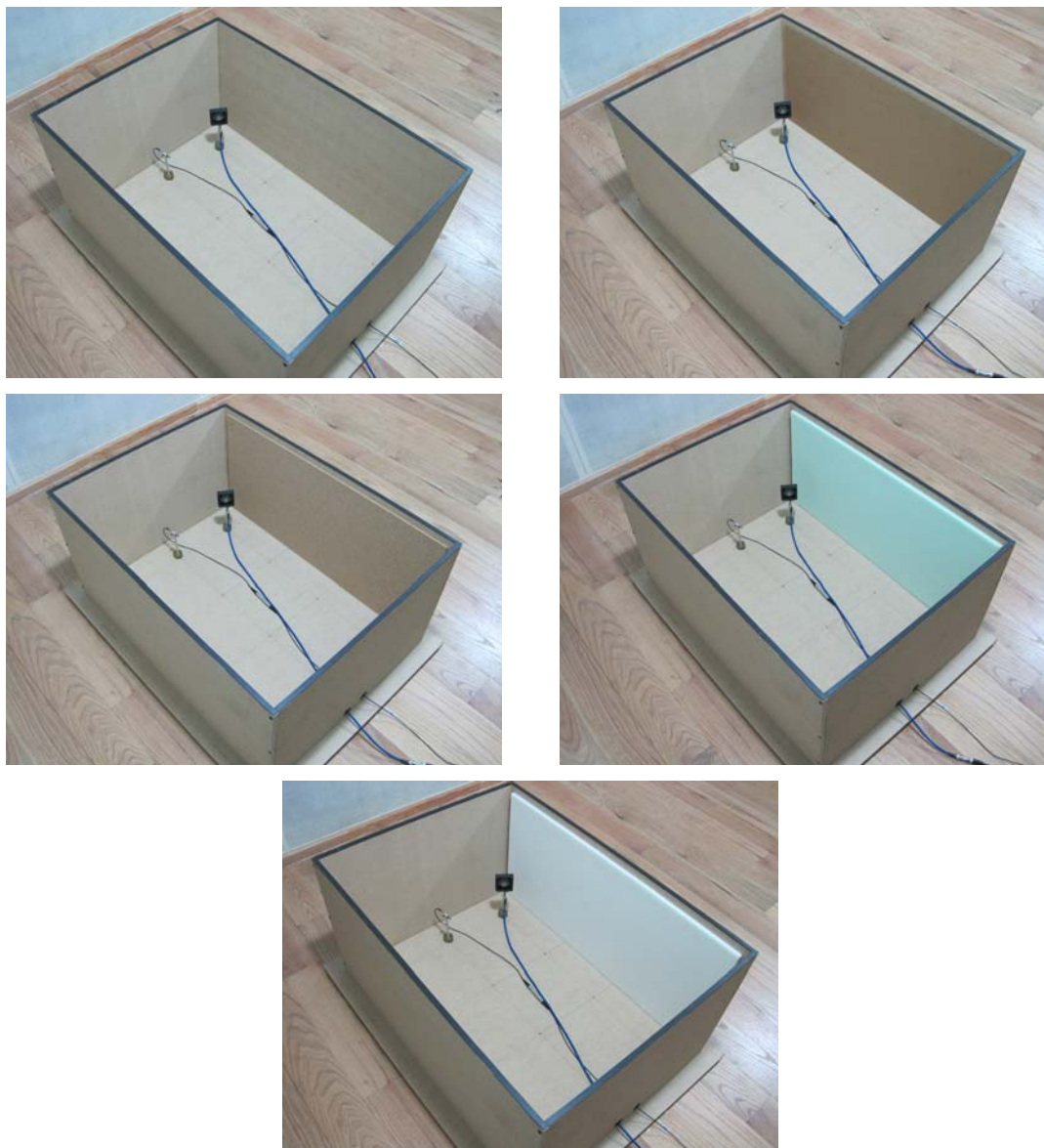


Fig. 5.73 a 5.77. Modelo físico a escala con material base (MDF), cartón corrugado, corcho y espumas de poliuretano suave (24 FME y 50 RF).

Para efectuar la comparación se determinó medir en una sola ubicación y direccionalidad de fuente y micrófono, como se muestra en la figura 5.78. Se midió tres veces por cada posición y frecuencia y se sacó un promedio, pues así se especifica en la norma.

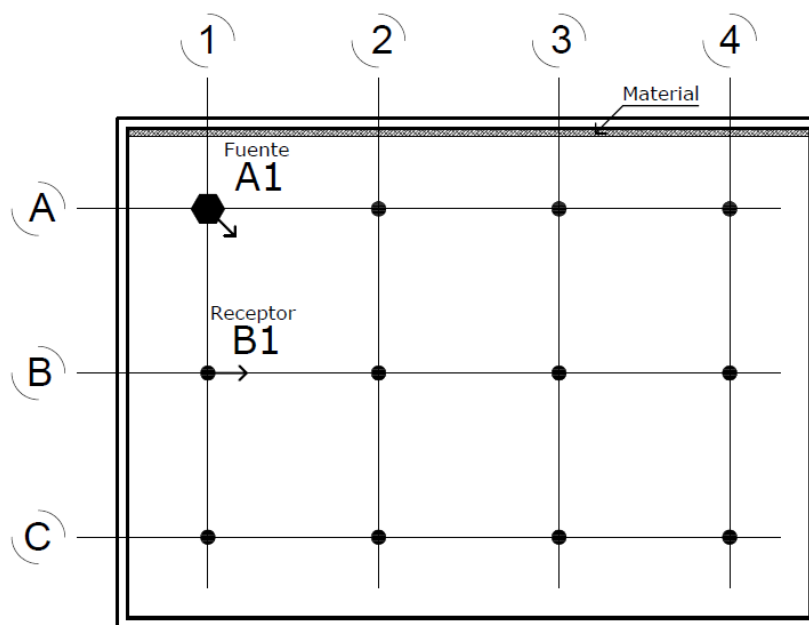


Fig. 5.78. Ubicación y direccionalidad de la fuente y micrófono en el modelo a escala 1:10.

El esquema de la figura 5.79, ejemplifica el proceso de medición según la Norma ISO 3382. La configuración de la medición se realiza por medio del *software* (instalado en la computadora), éste envía instrucciones al analizador para activar la fuente sonora. Una vez que la fuente sonora se apaga, el micrófono recibe la señal del decaimiento sonoro y la manda a través de un preamplificador. El analizador recibe, analiza y procesa la señal y una vez realizado este proceso, los resultados son enviados a la computadora como archivos en formato .txt., para su manipulación.



Fig. 5.79. Diagrama del proceso de medición para la obtención del tiempo de reverberación.

La señal se generó en bandas de octava en un rango de frecuencias desde 500 Hz hasta 10 000 Hz aproximadamente, debido a que es complicado detectar una señal por debajo de los 500 Hz o arriba de los 10 000 Hz para los micrófonos, pues en ocasiones el ruido de fondo los supera.

5.3.2.3.3. Resultados obtenidos

La tabla 5.12, muestra los resultados del tiempo de reverberación por bandas de octava, obtenidos en el modelo físico a escala 1:10 con las diferentes propuestas de materiales y la figura 5.80, muestra una comparación entre los tiempos de reverberación obtenidos.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN POR BANDAS DE OCTAVA Y MATERIALES EMPLEADOS EN EL MODELO FÍSICO A ESCALA					
FRECUENCIA	CASO				
	MDF	MDF/CARTÓN CORRUGADO	MDF/CORCHO	MDF/ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE 24 FME	MDF/ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE 50 RF
500 Hz	0.47	0.35	0.40	0.32	0.23
1 000 Hz	0.76	0.30	0.47	0.28	0.06
1 250 Hz	0.59	0.42	0.44	0.25	0.16
2 000 Hz	0.36	0.26	0.28	0.22	0.21
2 500 Hz	0.35	0.21	0.23	0.18	0.24
4 000 Hz	0.27	0.17	0.20	0.24	0.23
5 000 Hz	0.31	0.20	0.24	0.25	0.26
10 000 Hz	0.21	0.18	0.18	0.19	0.20

Tabla 5.12. Resultados finales del RT obtenidos en el modelo físico a escala.

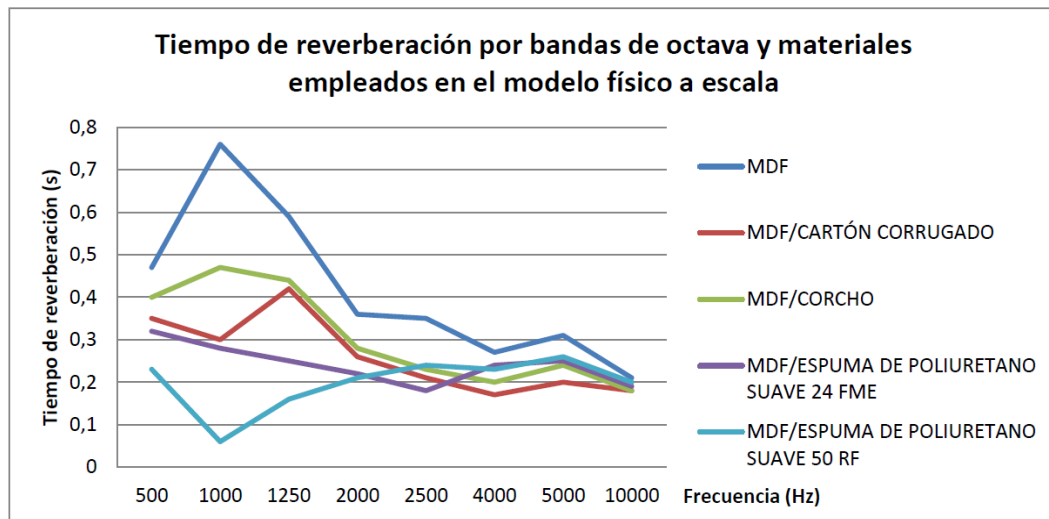


Fig. 5.80. Comparación entre los tiempos de reverberación de los diferentes casos obtenidos en el modelo físico a escala.

En la gráfica de la figura 5.80, puede observarse que el tiempo de reverberación obtenido con corcho y cartón corrugado, tuvieron un comportamiento similar, sobre todo entre las frecuencias de 2 250 Hz a 10 000 Hz. Con MDF, el RT fue considerablemente mayor en la frecuencia de 1 000 Hz, la espuma de poliuretano suave tipo 24 FME tuvo un comportamiento muy homogéneo en casi todas las frecuencias y por último, la espuma de poliuretano suave tipo 50 RF tuvo un deceso del RT en la frecuencia de 1 000 Hz, pero un comportamiento similar a la espuma tipo 24 FME entre las frecuencias de 2 000 Hz a 10 000 Hz.

Estos resultados se analizarán a detalle en la *Etapa 4* del proceso.

5.3.3. Etapa 3 – Comprobación de los coeficientes de absorción sonora de algunos materiales mediante un experimento en un caso de estudio, utilizando un modelo de simulación por computadora

En el Capítulo 1, se explican las ventajas y desventajas del uso de modelos de simulación acústica por computadora. Así mismo, se menciona que hoy en día, los modelos físicos a escala se utilizan de forma paralela con los modelos de simulación acústica por computadora, aunque estos últimos proporcionan resultados más rápidos y no obstante con algunas limitaciones en temas como dispersión y difracción (Ahnert et al. 2003).

Por lo anterior, se optó por la simulación del en un software especializado, en este caso se utilizó *CATT-Acoustics V8*⁶⁹, integrando los coeficientes de absorción sonora (obtenidos en tubo de impedancias) de algunos materiales en una base de datos del software.

Esta etapa supone la comprobación del modelo a escala 1:10, así como los coeficientes de absorción sonora obtenidos mediante el tubo de impedancias.

5.3.3.1. Modelo de simulación por computadora

5.3.3.1.1. Proceso de simulación

La simulación del espacio a escala real incluyendo cada material se realizó en *CATT-Acoustics*, realizando un modelo previo en Auto CAD. Así se generó un modelo en tercera dimensión a partir de mallas para posteriormente exportarlo a *CATT-Acoustics* (fig. 5.81).

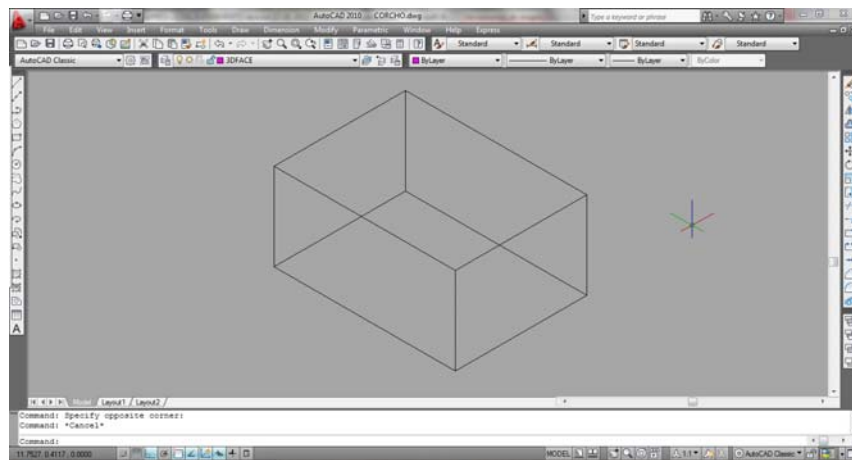


Fig. 5.81. Generación del modelo en Auto CAD.

Una vez exportado el modelo, se asignaron las propiedades de absorción de cada uno de los materiales basadas en los coeficientes de absorción obtenidos en el tubo de impedancias, a cada una de las superficies que conforman el espacio. Para ello se editó el archivo donde se encuentran las coordenadas de cada arista del espacio, así como los planos que lo conforman.

⁶⁹ Programa utilizado para la simulación y predicción acústica de recintos.

Las figura 5.82 y 5.83, muestran una ventana con el ejemplo de dicha edición, para la simulación de los espacios considerando MDF exclusivamente y MDF combinando con una superficie con cartón corrugado superpuesto al MDF.

Debido a que los espacios se modelaron escala 1:1 (real) en CATT-Acoustics, los valores de absorción se escalaron a frecuencias medias y altas, obtenidas mediante el tubo de impedancias. Así se escalaron 1.25 kHz a 125 Hz, 2.5 kHz a 250 Hz y 5 kHz a 500 Hz, sin embargo como no se obtuvieron valores del coeficiente de absorción sonora en la frecuencias de 10 kHz, 20 kHz y 40 kHz, se añadieron a estas frecuencias los valores de 5 kHz, o bien de 500 Hz si lo consideramos escalado.

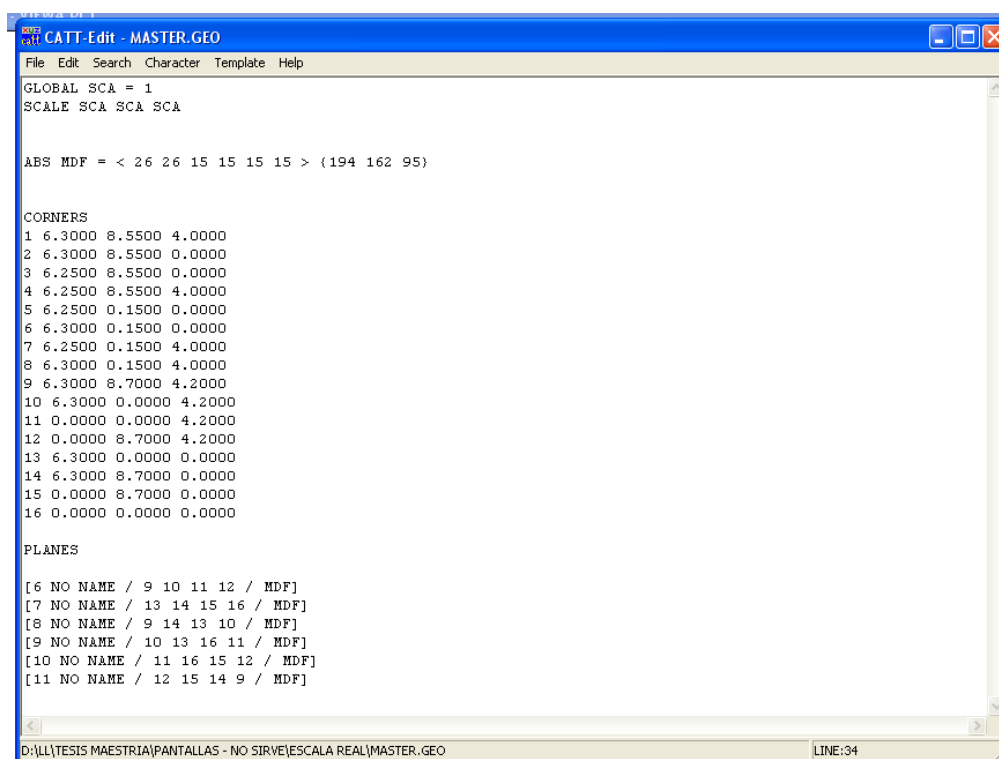


Fig. 5.82. Ventana editada para espacio de MDF.

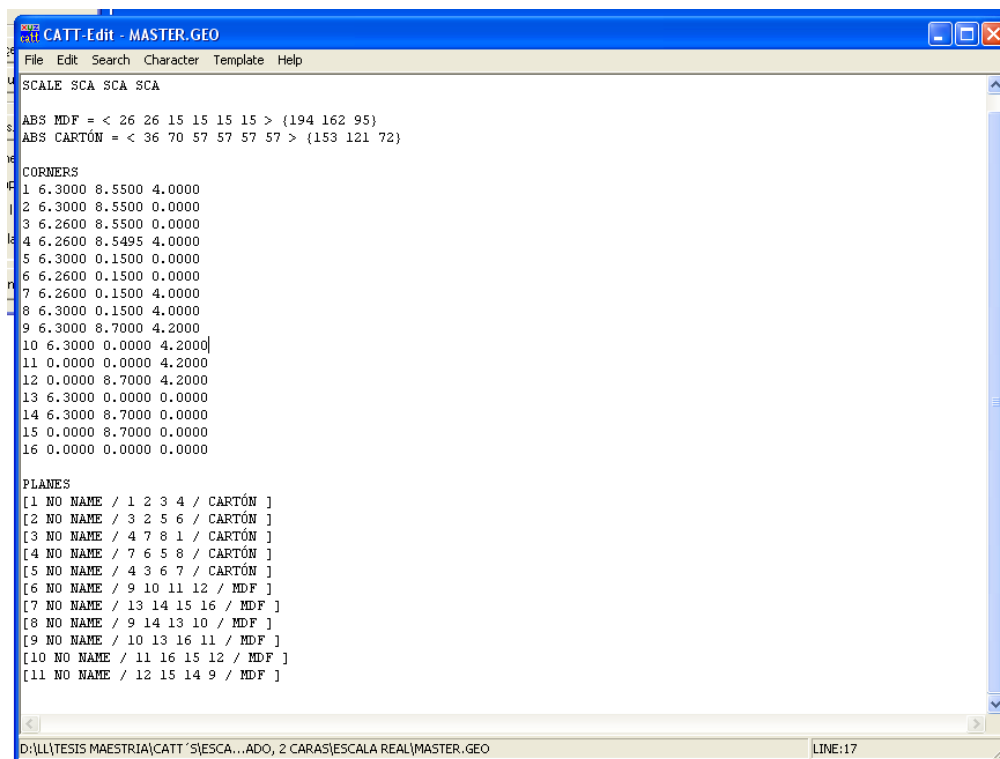
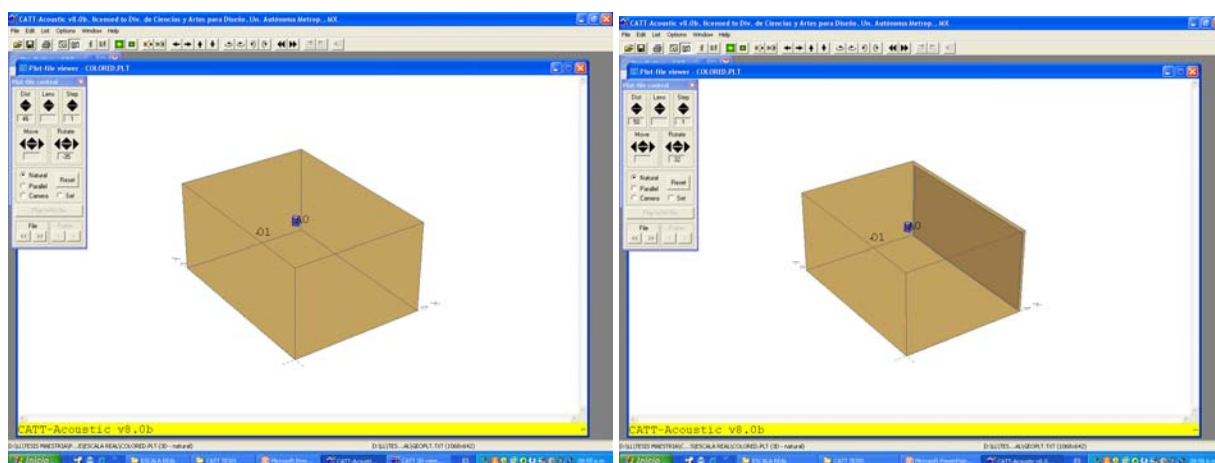


Fig. 5.83. Ventana editada para espacio de MDF combinado con una superficie con cartón corrugado.

Ya editados los coeficientes de absorción sonora, el modelo en *CATT-Acoustics* se puede visualizar. Las figuras 5.84 a 5.88, se muestran las visualizaciones de todos los espacios propuestos.



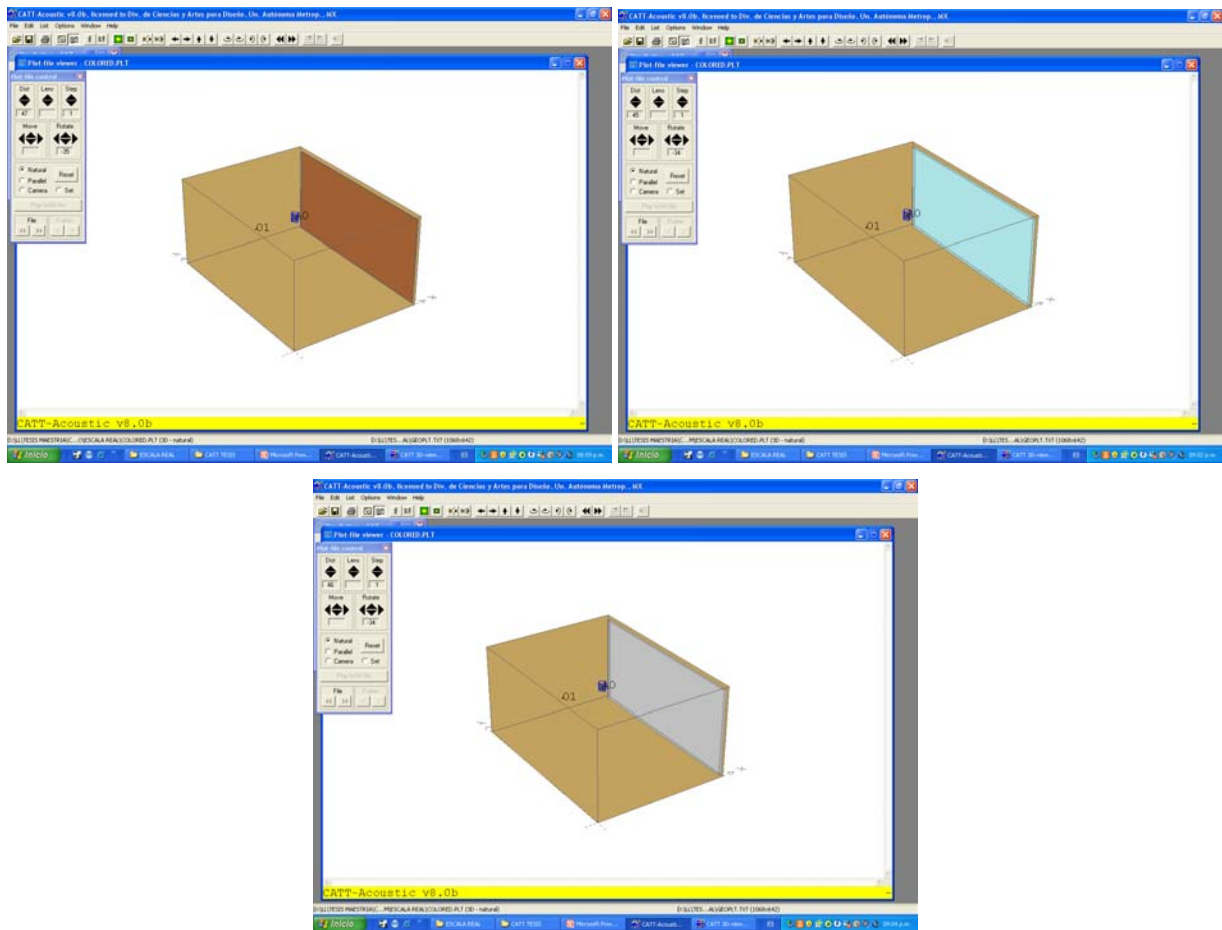


Fig. 5.84 a 5.88. Visualización de todos los espacios propuestos.

5.3.3.2. Obtención del tiempo de reverberación

Para obtener el tiempo de reverberación, primero se realizó la caracterización de la fuente en el programa de simulación acústica, para lo cual se añadieron los valores de presión sonora obtenidos en la caracterización física de la fuente en miniatura. Este procedimiento asegura la utilización de la misma fuente en ambos casos (real y virtual), en relación a su comportamiento y respuesta sonora.

Al igual que con los valores de los coeficientes de absorción sonora, se añadieron los valores de presión sonora escalados, de la misma forma que se explicó anteriormente (para caracterización de la fuente en *CATT-Acoustics* ver Anexo 7).

Posteriormente se configuró la ubicación y direccionalidad de la fuente, y el receptor en el espacio, para asegurar que la respuesta de ambos elementos fuera lo más parecido al modelo a escala 1:10, como se observa en la figura 5.89.

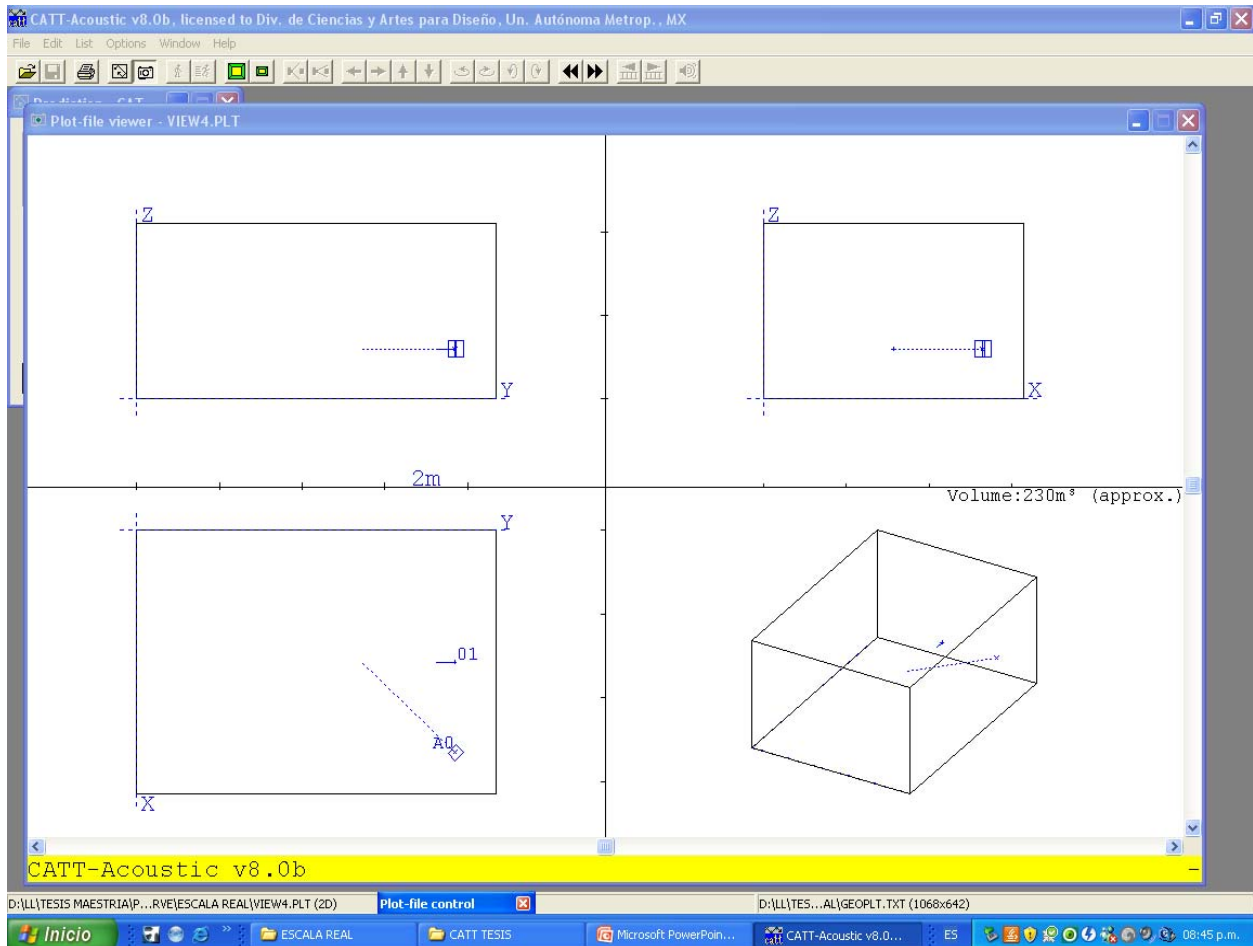


Fig. 5.89. Ubicación y direccionalidad de la fuente y receptor en el modelo virtual.

Por último se configuró la medición, para la obtención del tiempo de reverberación en las frecuencias establecidas en el programa, como se observa en la figura 5.90.

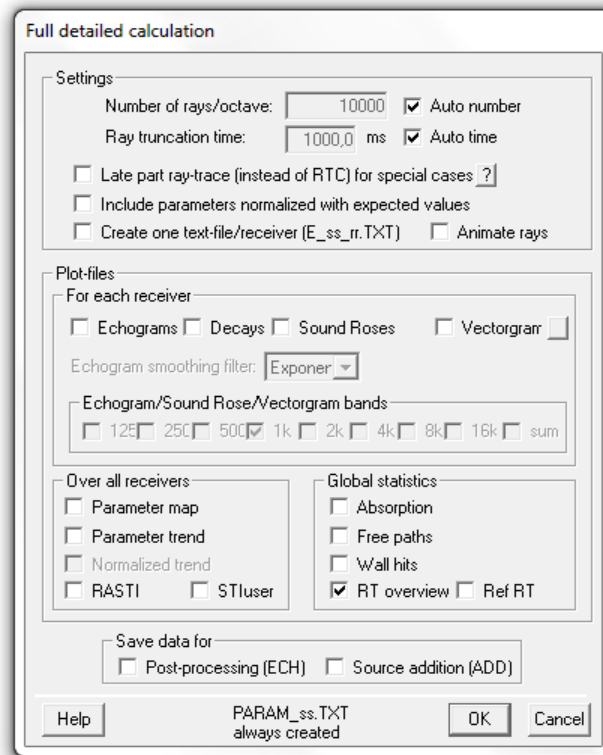


Fig. 5.90. Ventana de configuración de la medición.

Debido a las restricciones en frecuencias del programa, la medición se realizó en las siguientes bandas de octava: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz y 4 000 Hz.

5.3.3.2.1. Resultados obtenidos

La tabla 5.13, muestra los resultados del tiempo de reverberación por bandas de octava, obtenidos en el modelo de simulación por computadora con las diferentes configuraciones de materiales y la figura 5.91, muestra una comparación entre los tiempos de reverberación obtenidos.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN POR BANDAS DE OCTAVA Y MATERIALES EMPLEADOS EN EL MODELO DE SIMULACIÓN POR COMPUTADORA					
FRECUENCIA	CASO				
	MDF	MDF/CARTÓN CORRUGADO	MDF/CORCHO	MDF/ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE 24 FME	MDF/ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE 50 RF
125 Hz	0.57	0.53	0.56	0.53	0.49
250 Hz	0.57	0.46	0.55	0.52	0.45
500 Hz	1.01	0.75	0.85	0.70	0.69
1 000 Hz	1.00	0.74	0.85	0.68	0.69
2 000 Hz	0.97	0.72	0.83	0.69	0.66
4 000 Hz	0.87	0.67	0.76	0.62	0.60

Tabla 5.13. Resultados finales del RT obtenidos en el modelo de simulación por computadora.

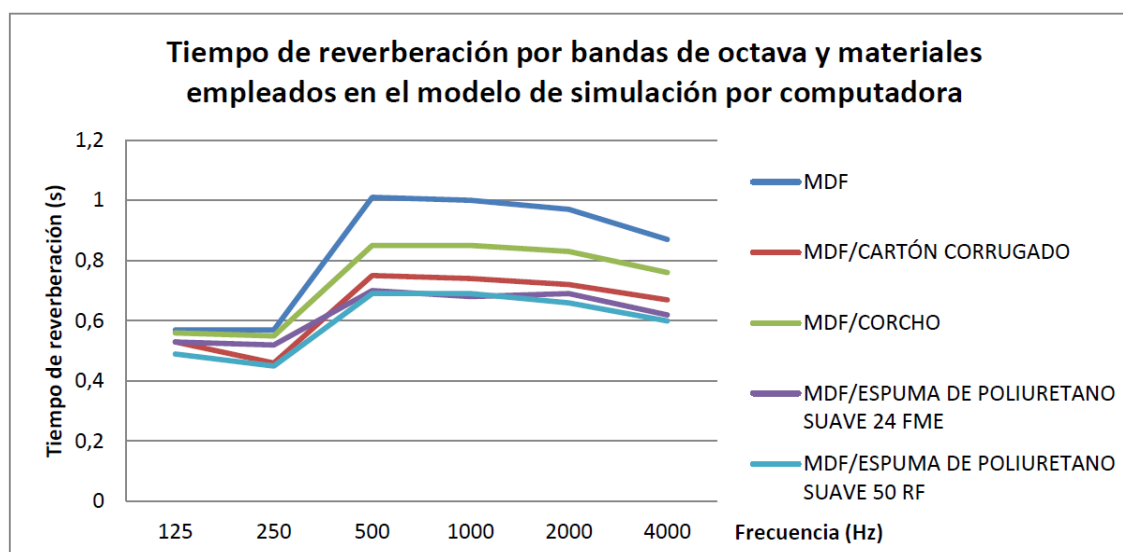


Fig. 5.91. Comparación entre los tiempos de reverberación obtenidos en el modelo a escala.

En la gráfica de la figura 5.91, puede observarse que el tiempo de reverberación con todas las configuraciones de materiales tienen el mismo comportamiento, pero no los mismos valores. Con espumas de poliuretano suave, los valores coinciden casi exactamente, siendo las que obtuvieron el RT más bajo de todos los materiales. Con cartón corrugado, el RT aumenta un poco en las frecuencias de 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz y 4 000 Hz y disminuye en la de 250 Hz, en relación a las espumas de poliuretano, mientras que con corcho y MDF, los valores aumentan considerablemente en las frecuencias antes mencionadas, siendo el RT del MDF el más alto de todas las configuraciones.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6. Discusión y análisis de resultados

En este capítulo se analizan, comparan y discuten los resultados obtenidos tanto en el modelo físico a escala como en el modelo de simulación por computadora, para ello fue necesario referirse a algunos artículos de investigación a fin de comprender e interpretar los resultados obtenidos en ambos casos.

6.1. Comparación de resultados

Para realizar una comparación entre todos los casos (coeficientes de absorción obtenidos por el método de tubo de impedancias, modelo físico a escala y modelo de simulación por computadora) fue necesario cotejar las frecuencias en las cuales se obtuvieron resultados de cada uno de ellos y determinar las que pudieran compararse. La tabla 6.1, muestra dicha comparación.

CASO	FRECUENCIAS ANALIZADAS Y FRECUENCIAS COMPARADAS											
Coeficientes de absorción sonora obtenidos por tubo de impedancias	analizadas	125 Hz - 5 300 Hz										
	comparadas			1 250 Hz		2 500 Hz		5 000 Hz				
Tiempo de reverberación obtenido en modelo físico a escala (1:10)	analizadas	500 Hz	1 000 Hz	1 250 Hz	2 000 Hz	2 500 Hz	4 000 Hz	5 000 Hz	8 000 Hz	10 000 Hz	-	-
	comparadas			1 250 Hz		2 500 Hz		5 000 Hz				
Tiempo de reverberación obtenido en simulación por computadora (1:1)	analizadas	-	-	125 Hz	-	250 Hz	-	500 Hz	-	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000Hz
	comparadas			125 Hz		250 Hz		500 Hz				

Tabla 6.1. Comparación de frecuencias en cada caso.

Como puede observarse en la tabla 6.1, las frecuencias comparables entre todos los casos son 125 Hz (1:1) o 1 250 Hz (1:10), 250 Hz (1:1) o 2 500 Hz (1:10) y 500 Hz (1:1) o 5 000 Hz (1:10).

Después de haber definido las frecuencias comparables, se realizaron tablas y gráficas comparativas del tiempo de reverberación obtenido de:

- El modelo físico a escala
- La simulación por computadora (*CATT-Acoustics*)

- La aplicación de la fórmula de Sabine⁷⁰ en los casos anteriores.

A continuación se muestran las tablas y gráficas comparativas del RT en cada caso (tablas de 6.2 a 6.6 y figuras de 6.1 a 6.5):

SIMULACIONES CON MDF					
SIMULACIÓN	MÉTODO	TIEMPO DE REVERBERACIÓN (s)			
		1 250 HZ	2 500 HZ	5 000 HZ	
Modelo físico a escala (1:10)	Medición en modelo	0.59	0.35	0.31	
Modelo físico a escala (1:10)	Aplicación de fórmula de Sabine	0.061	0.059	0.100	
SIMULACIÓN	MÉTODO	125 HZ	250 HZ	500 HZ	
CATT-Acoustics (1:1)	Medición en software	0.57	0.57	1.01	
Espacio real (1:1)	Aplicación de fórmula de Sabine	0.613	0.590	0.995	

Tabla 6.2. Comparativa del RT por simulaciones con MDF.

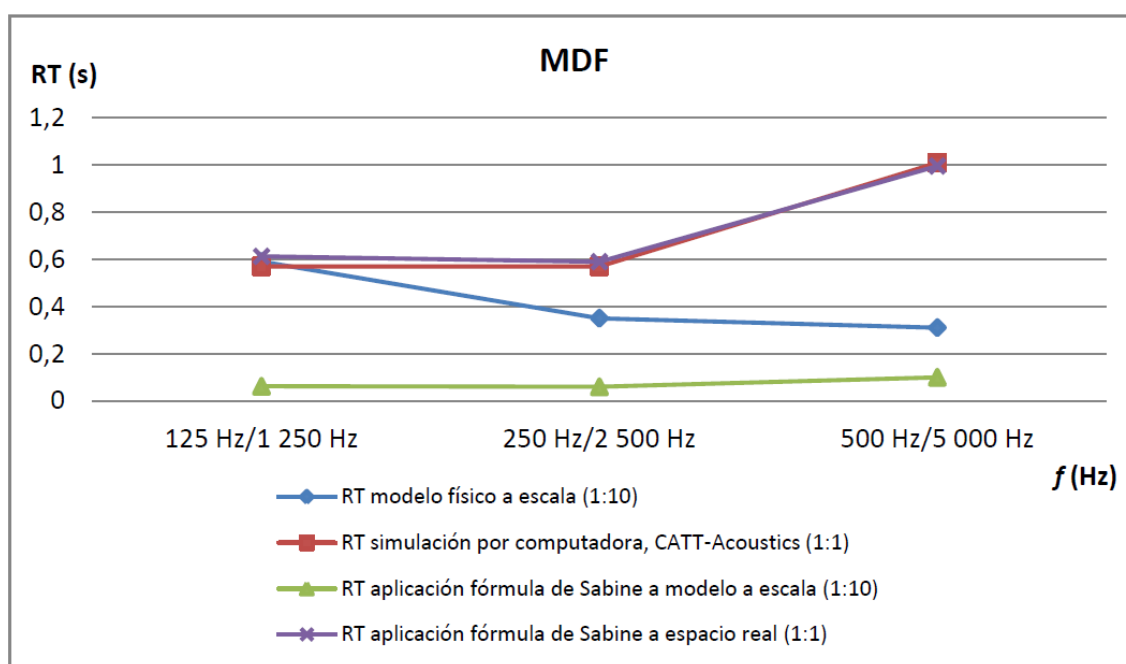


Fig. 6.1. Gráfica comparativa del RT por simulaciones con MDF.

⁷⁰ Para la aplicación de la fórmula de Sabine, se consideraron los valores de coeficiente de absorción obtenidos en el tubo de impedancias.

SIMULACIONES CON MDF Y CARTÓN CORRUGADO				
SIMULACIÓN	MÉTODO	TIEMPO DE REVERBERACIÓN (s)		
		1 250 HZ	2 500 HZ	5 000 HZ
Modelo físico a escala (1:10)	Medición en modelo	0.42	0.21	0.20
Modelo físico a escala (1:10)	Aplicación de fórmula de Sabine	0.057	0.047	0.072
<i>CATT-Acoustics</i> (1:1)	Medición en software	0.53	0.46	0.75
Espacio real (1:1)	Aplicación de fórmula de Sabine	0.573	0.474	0.720

Tabla 6.3. Comparativa del RT por simulaciones con MDF y cartón corrugado.

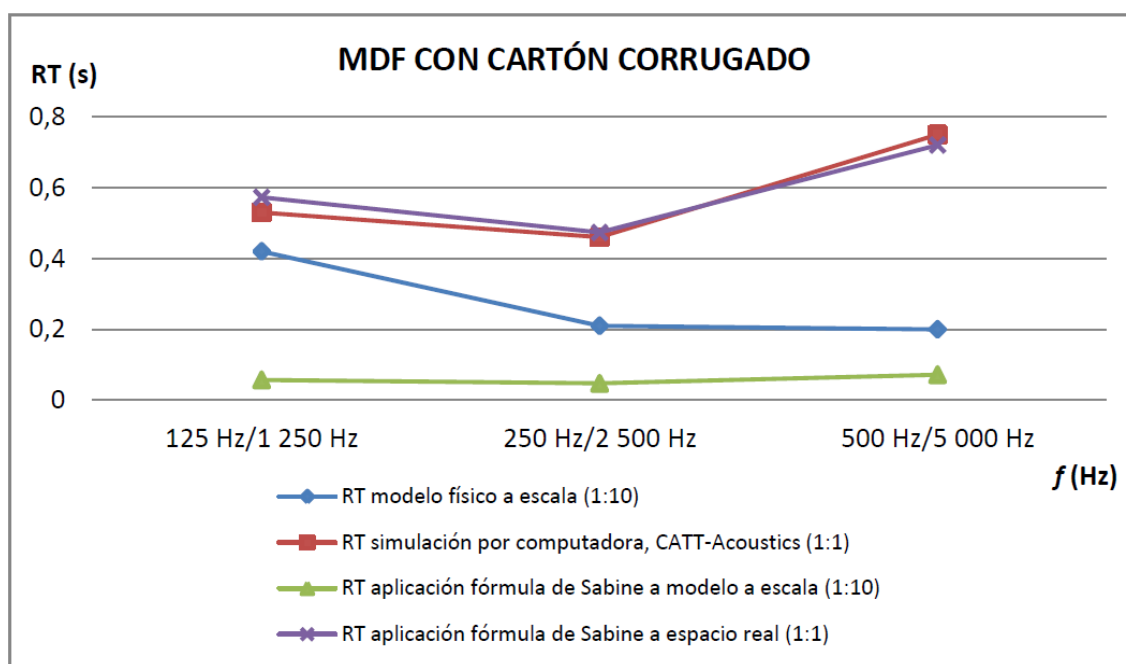


Fig. 6.2. Gráfica comparativa del RT por simulaciones con MDF y cartón corrugado.

SIMULACIONES CON MDF Y CORCHO				
SIMULACIÓN	MÉTODO	TIEMPO DE REVERBERACIÓN (s)		
		1 250 HZ	2 500 HZ	5 000 HZ
Modelo físico a escala (1:10)	Medición en modelo	0.44	0.23	0.24
Modelo físico a escala (1:10)	Aplicación de fórmula de Sabine	0.060	0.057	0.084
<i>CATT-Acoustics</i> (1:1)	Medición en software	0.56	0.55	0.85
Espacio real (1:1)	Aplicación de fórmula de Sabine	0.600	0.572	0.841

Tabla 6.4. Comparativa del RT por simulaciones con MDF y corcho.

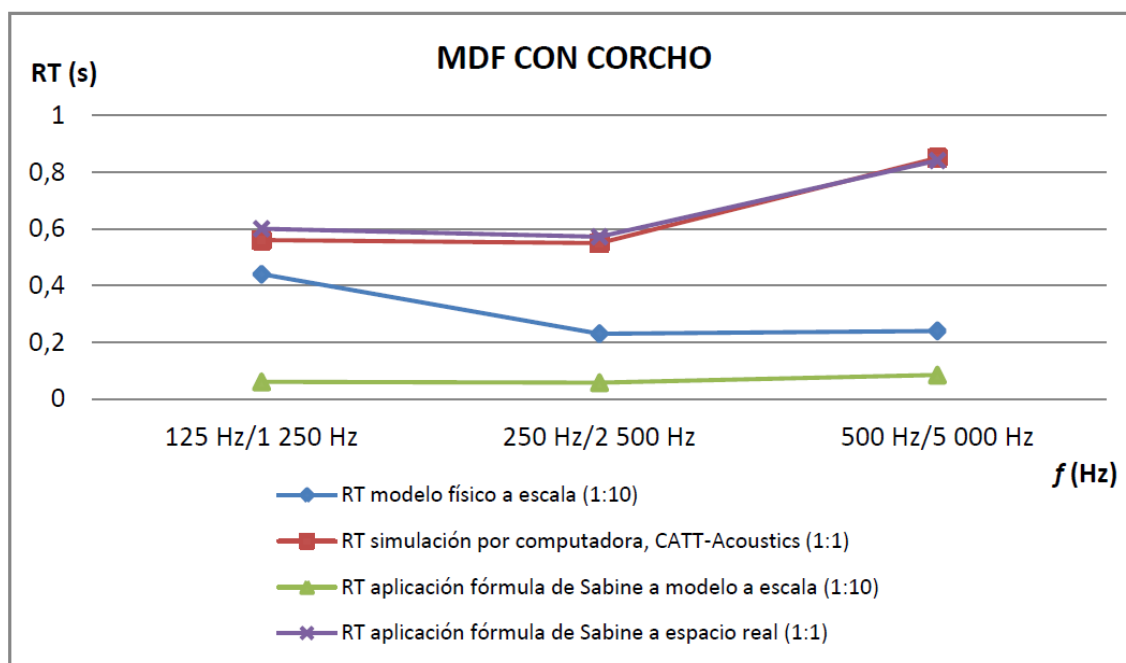


Fig. 6.3. Gráfica comparativa del RT por simulaciones con MDF y corcho.

SIMULACIONES CON MDF Y ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE, 24 FME				
SIMULACIÓN	MÉTODO	TIEMPO DE REVERBERACIÓN (s)		
		1 250 HZ	2 500 HZ	5 000 HZ
Modelo físico a escala (1:10)	Medición en modelo	0.25	0.18	0.25
Modelo físico a escala (1:10)	Aplicación de fórmula de Sabine	0.056	0.054	0.062
		125 HZ	250 HZ	500 HZ
CATT-Acoustics (1:1)	Medición en software	0.53	0.52	0.70
Espacio real (1:1)	Aplicación de fórmula de Sabine	0.557	0.544	0.623

Tabla 6.5. Comparativa del RT por simulaciones con MDF y espuma de poliuretano suave, 24 FME.

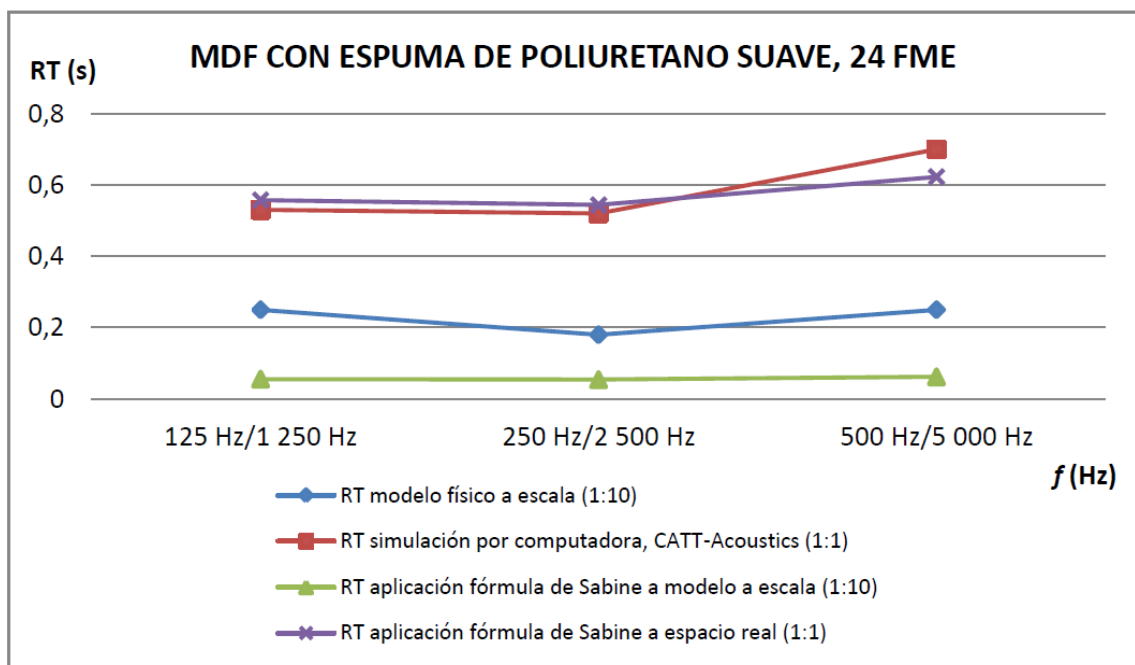


Fig. 6.4. Gráfica comparativa del RT por simulaciones con MDF y espuma de poliuretano suave, 24 FME.

SIMULACIONES CON MDF Y ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE, 50 RF				
SIMULACIÓN	MÉTODO	TIEMPO DE REVERBERACIÓN (s)		
		1 250 HZ	2 500 HZ	5 000 HZ
Modelo físico a escala (1:10)	Medición en modelo	0.16	0.24	0.26
Modelo físico a escala (1:10)	Aplicación de fórmula de Sabine	0.052	0.043	0.062
		125 HZ	250 HZ	500 HZ
CATT-Acoustics (1:1)	Medición en software	0.49	0.45	0.69
Espacio real (1:1)	Aplicación de fórmula de Sabine	0.518	0.426	0.619

Tabla 6.6. Comparativa del RT por simulaciones con MDF y espuma de poliuretano suave, 50 RF.

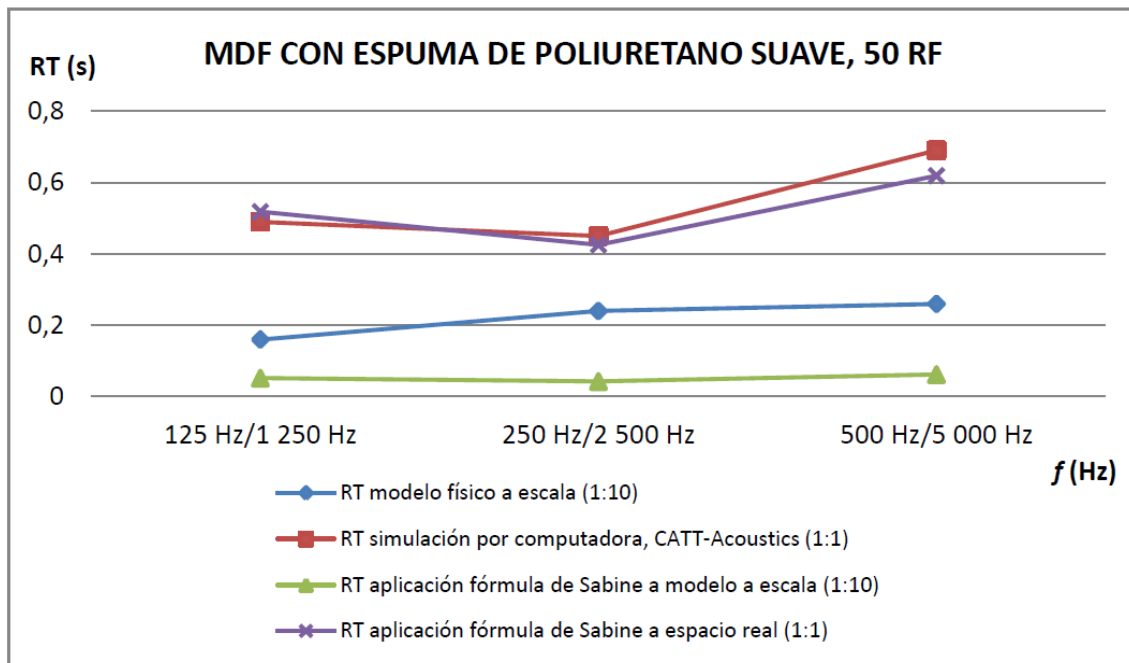


Fig. 6.5. Gráfica comparativa del RT por simulaciones con MDF y espuma de poliuretano suave, 50 RF.

De acuerdo a las tablas y gráficas anteriores, puede observarse lo siguiente:

- En todos los casos, a excepción de la frecuencia de 125 Hz con MDF, el RT obtenido en el modelo físico a escala, no es comparable con los valores obtenidos en el modelo de simulación por computadora, ni con los obtenidos a partir de la aplicación de la fórmula de Sabine⁷¹ a cada caso.
- Pueden observarse dos comportamientos diferentes entre el RT del modelo físico a escala y el RT del modelo de simulación por computadora en casi todos los casos, pues en el caso de la espuma de poliuretano suave (50 RF) no se cumple. El primero tiende a disminuir en cuanto aumenta la frecuencia; y el segundo tiende a aumentar en cuanto aumenta la frecuencia.
- En casi todos los casos, exceptuando la espuma de poliuretano suave (50 RF), entre mayor es la frecuencia, mayor desviación existe entre el RT del modelo físico a escala y

⁷¹ Aplicación de la fórmula de Sabine, se refiere al desarrollo de dicha fórmula de manera manual, a partir de conocer el volumen del espacio, el área de las superficies y el coeficiente de absorción sonora de los materiales. El coeficiente de los materiales se obtuvo mediante el tubo de impedancias.

el RT del modelo de simulación por computadora. Sin embargo este fenómeno no es muy evidente en el caso con espuma de poliuretano suave (24 FME).

En adición a lo anterior, puede observarse que la desviación entre el RT del modelo a escala y el RT del modelo de simulación por computadora, es más regular en el caso de las espumas de poliuretano.

- Ahora bien, si se observan a detalle las gráficas, ocurre el siguiente fenómeno: entre más “reflejante”⁷² es un material, mayor correlación de datos habrá, un ejemplo de ello es el caso del MDF en la frecuencia de 125 Hz o 1 250 Hz, mientras que con el cartón corrugado y el corcho hay una diferencia de casi una unidad. Sin embargo, mientras más “poroso”⁷³ es, la correlación de valores se desvía más, como por ejemplo las espumas de poliuretano suave en la frecuencia de 125 Hz o 1 250 Hz, donde se desvían por casi tres unidades.
- Por otra parte, se observa una correlación de valores entre el RT obtenido en la simulación por computadora del espacio real y el RT obtenido a partir de la aplicación de la fórmula de Sabine. Lo anterior indica que la obtención del RT por simulación por computadora es confiable, pues por método manual se obtienen los mismos valores, además de tener una relación directa con los coeficientes de absorción sonora, por lo que si el coeficiente es bajo, el RT será alto y si el coeficiente es alto, el RT será bajo.
- La aplicación de la fórmula de Sabine para obtener el RT del modelo físico a escala es 10 veces menor que el del espacio real, lo que supone que debieron obtenerse dichos valores en el modelo físico a escala, lo cual no fue así.

Ahora bien, de acuerdo a lo anterior, si consideramos que los valores obtenidos en la simulación por computadora son correctos, puede expresarse en porcentaje el error entre el modelo físico a escala y el modelo de simulación por computadora. Las figuras 6.6 a 6.10 expresan el grado de desviación entre ambas simulaciones, para cada caso.

⁷² En este caso lo reflejante se refiere a una apreciación visual.

⁷³ En este caso lo poroso se refiere a una apreciación visual.

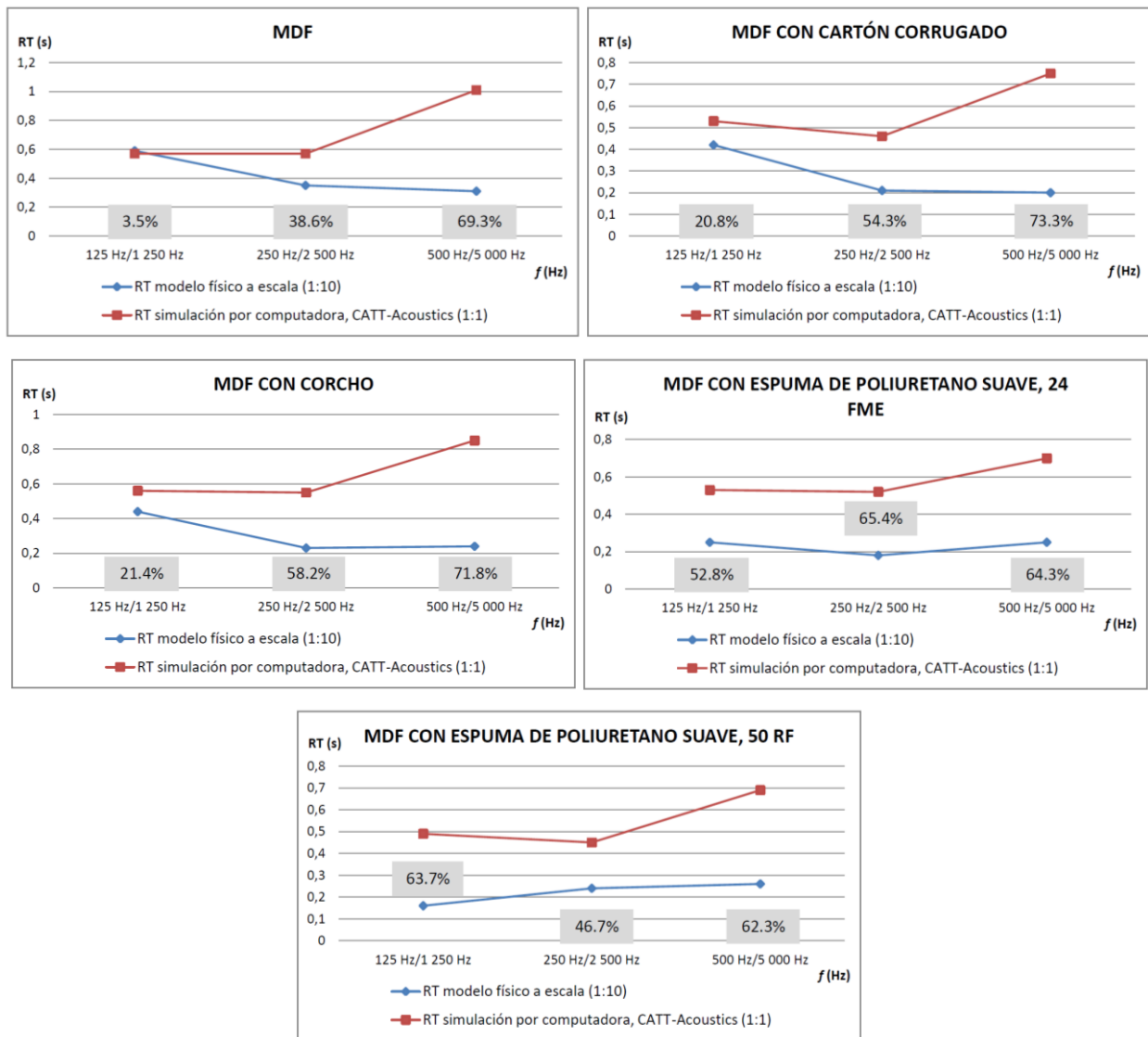


Fig. 6.6 a 6.10. Error relativo del RT entre simulaciones.

Se puede observar que la mayor desviación entre simulaciones se produce en la frecuencia de 500 Hz o 5 000 Hz, mientras que en la frecuencia de 125 Hz o 1 250 Hz es relativamente pequeña para los siguientes casos: MDF, cartón corrugado y corcho; pero considerable para las espumas de poliuretano suave.

6.2. Discusión

Pretendiendo interpretar y comprender los valores obtenidos y los fenómenos observados en las gráficas, se puede decir lo siguiente:

- Tal pareciera que los resultados no pueden correlacionarse por la capacidad de absorción sonora de los materiales, sino por otras características acústicas de los mismos, como las menciona Juliá (2008) en su tesis de doctorado, especificando que hay diversos parámetros que caracterizan acústicamente a un material, tales como: impedancia, porosidad, tortuosidad, resistencia al flujo, entre otros. Dichos parámetros van en función de las características físicas de los materiales, como por ejemplo en el caso de la resistencia al flujo, la cual depende de la densidad del material y del tamaño del poro o fibra del mismo.

Una situación relacionada con lo antes mencionado, es el caso del corcho y la espuma de poliuretano suave (24 FME), de los cuales el NRC es de 0.42 para ambos, y si observamos las gráficas del coeficiente de absorción sonora, el comportamiento entre ellos es completamente distinto. Otro ejemplo se presenta en el caso de las espumas de poliuretano, donde al obtener el RT de los modelos físicos a escala, éste resultó casi exactamente igual entre las frecuencias de 4 000 Hz a 10 000 Hz, sin embargo el coeficiente de absorción sonora de ambos es distinto.

Según González et al. (2006), los materiales pueden clasificarse de acuerdo a sus características acústicas en dos grupos: por sus propiedades extrínsecas⁷⁴ y por sus propiedades intrínsecas⁷⁵ (estas últimas están condicionadas por parámetros de fabricación, tales como, componentes que conforman el material y el método de fabricación, entre otros). Un ejemplo del primer grupo es el coeficiente de absorción sonora, mientras que para el segundo grupo son la impedancia, porosidad, tortuosidad, resistividad al flujo, entre otros.

⁷⁴ Esta propiedad varía con la frecuencia y espesor del material.

⁷⁵ Esta propiedad determina el comportamiento del aire al interior del material, por lo que sólo las poseen los materiales porosos, tales como fieltro, espumas, entre otros, ya que poseen una parte sólida y otra fluida.

Así mismo, estos autores mencionan que en los materiales se producen tres tipos de transmisión de ondas: compresión del marco estructural (ondas longitudinales y vibratorias), cortante del marco estructural (ondas de flexión vibratorias) y compresión del fluido en el material (ondas longitudinales acústicas), las cuales sólo se producen en materiales porosos. Dicho comportamiento de las ondas, depende de las propiedades antes mencionadas.

Otra referencia importante, es el artículo de investigación de Alba et al. (2006), quienes realizan una indagación sobre diferentes materiales utilizados en la construcción en relación a su comportamiento de impedancia acústica y coeficiente de absorción sonora. La tabla 6.7 muestra los materiales medidos, así como el grosor y densidad de los mismos.

Material		grosor (cm)	Densidad (kg/m ³)	Material		grosor (cm)	Densidad (kg/m ³)
Lana de vidrio	1	1,535	62,2	lam+reticulada	20	0,56	710,5
Taca textil reciclada	2	1,4	56,8	elast+reticulada	21	1,22	574
Lámina impacto	3	1,1	28,9	lamina+espuma	22	0,185	903,3
Foam gris	4	2,465	16,1	Lana poliéster+ret	23	1,5	419,1
Foam gris	5	5,72	16,7	esp rec+lam+esp rec	24	3,46	236,9
Lana roca	6	3,56	69,3	Lamina	25	0,27	501
Lana roca	7	3,88	18,5	espuma+lam+taca	26	2,5	267,4
Lana roca	8	3,97	72,2	Sándwich+lam+ sandwich	27	3,58	180
Lamina fina Lámina impacto	9	0,22	36,2	Elástica	15	0,3	265,3
Lana roca densa	10	1,4	170,5	Lamina	29	0,18	1591,5
prensado verde	11	0,72	243,2	Lamina	30	0,195	2122,1
Sanch. Lam.	12	0,37	752,8	lamina+taca	31	0,295	1753,4
rec. Espumas	13	1,89	172,6	elast+lana vidrio	32	0,22	2025,6
Reticulado	14	0,41	19,4	lamina bituminosa	33	0,46	1522,4
Mat. Multicapa	15	0,33	868,1	lamina fibras	34	0,711	570,8
lamina asf+ Lana vidrio	16	1,52	371,7	rec. espumas	35	1,95	179,6
lamina+taca	17	0,76	335,1	lami elastica	36	0,27	1856,8
Lana vidrio+lamina+ Lana vidrio	18	1,6	392,9	espuma	37	3,85	12,4
taca+lamina+taca	19	3,3	243,6	Foam gris	38	0,9	17,7

Tabla 6.7. Materiales medidos, empleados en la construcción. (Alba et al. 2006)

De dichos materiales obtuvieron la impedancia y el coeficiente de absorción sonora mediante un tubo de impedancias y los clasificaron en orden ascendente en relación al

coeficiente de absorción sonora, mostrando a un costado el valor de la impedancia acústica de cada uno, como se muestra en la figura 6.11.

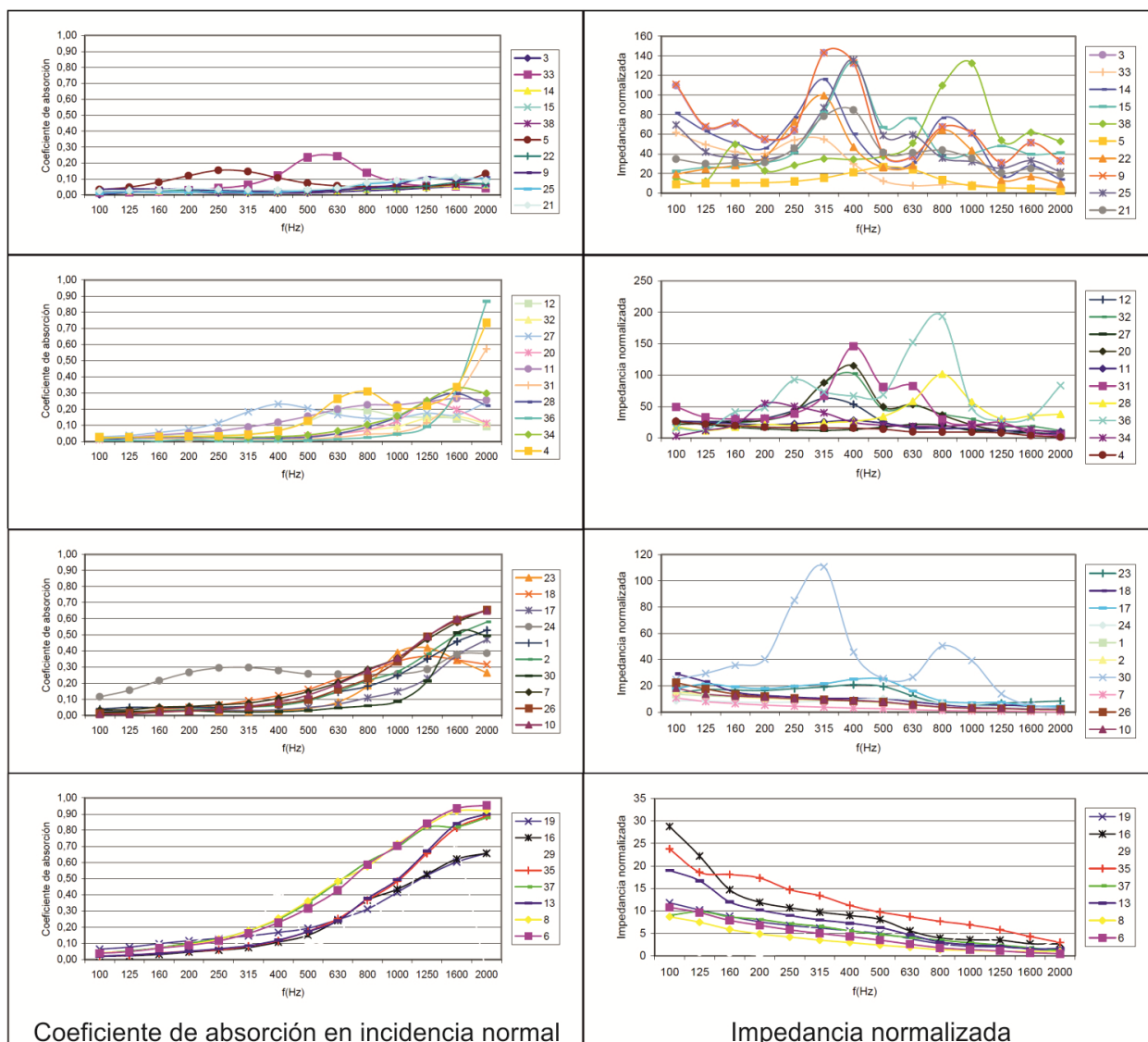


Fig. 6.11. Resultados del coeficiente de absorción sonora e impedancia acústica de materiales utilizados en la construcción. (Alba et al. 2006)

En la figura 6.11 se puede observar como coeficientes de absorción sonoros bajos se asocian con valores de impedancia altos en frecuencias medias, mientras que coeficientes de absorción altos en frecuencias altas se asocian con valores de impedancia altos en frecuencias bajas.

- Por otra parte, es importante referirnos al artículo de investigación de Yong, Kwan, Hee y Sato (2008), donde muestran los resultados del tiempo de reverberación obtenidos en el espacio real (sin audiencia), en el modelo físico a escala (con audiencia) y en el modelo de simulación por computadora (del espacio real con y sin audiencia y del modelo físico a escala con audiencia) de la Sala de Artes de Gimhae. La tabla 6.8 muestra dichos resultados.

COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN OBTENIDOS EN EL ESPACIO REAL, EN EL MODELO FÍSICO A ESCALA Y EN LAS SIMULACIONES POR COMPUTADORA								
CONDICIÓN	OBJETIVO	MÉTODO	TIEMPO DE REVERBERACIÓN (s)					
			125 HZ	250 HZ	500 HZ	1K (HZ)	2K (HZ)	4K (HZ)
Desocupado	Espacio real	Medición	1.68	1.57	1.56	1.59	1.52	1.25
	Espacio real	Simulación	1.71	1.64	1.55	1.56	1.53	1.31
Ocupado	Espacio real	Simulación	1.70	1.62	1.52	1.53	1.50	1.28
	Modelo a escala	Medición	2.70	2.34	2.27	2.03	1.68	1.73
	Modelo a escala	Simulación	2.83	2.26	2.12	1.83	1.75	1.63

Tabla 6.8. Resultados del tiempo de reverberación obtenidos en el espacio real, en el modelo físico a escala y en las simulaciones por computadora. (Adaptada de: Yong et al. 2008, p. 623)

Puede observarse una diferencia de casi una unidad en todas las frecuencias, por lo que los autores concluyen que es casi imposible reproducir en un modelo a escala, de manera exacta, las características acústicas de un espacio real.

Es importante mencionar la metodología empleada por dichos autores. Primero seleccionaron los materiales de acuerdo a su grado de absorción sonora, el cual se obtuvo a partir de la medición de los mismos en una cámara reverberante en miniatura, escala 1:10. De la misma manera, clasificaron los resultados de la siguiente forma: las frecuencias de 1 250 Hz, 2 500 Hz, 5 000 Hz, 10 000 Hz, 20 000 Hz y 40 000 Hz las compararon con las de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz y 4 000 Hz respectivamente de materiales utilizados en la construcción. Por otra parte, emplearon una fuente dodecaédrica en miniatura y micrófonos de 1/8" para simular la fuente sonora y receptor respectivamente. Y como señal de excitación, ocuparon un tipo de señal MLS⁷⁶.

⁷⁶ La señal MLS es un conjunto de señales binarias y periódicas dentro de un periodo, que puede acercarse a una señal aleatoria, a diferencia del ruido blanco, el cual tiene un espectro de potencia plano.

A parte de medir el RT en el espacio real y en el modelo físico a escala, midieron otros parámetros de calidad acústica, tales como, EDT (primer tiempo de descenso), C_{80} (claridad) y IACC (coeficiente de correlación cruzada inter-aural). La figura 6.12 muestra la diferencia de valores entre los distintos parámetros, siendo más evidente el de C_{80} .

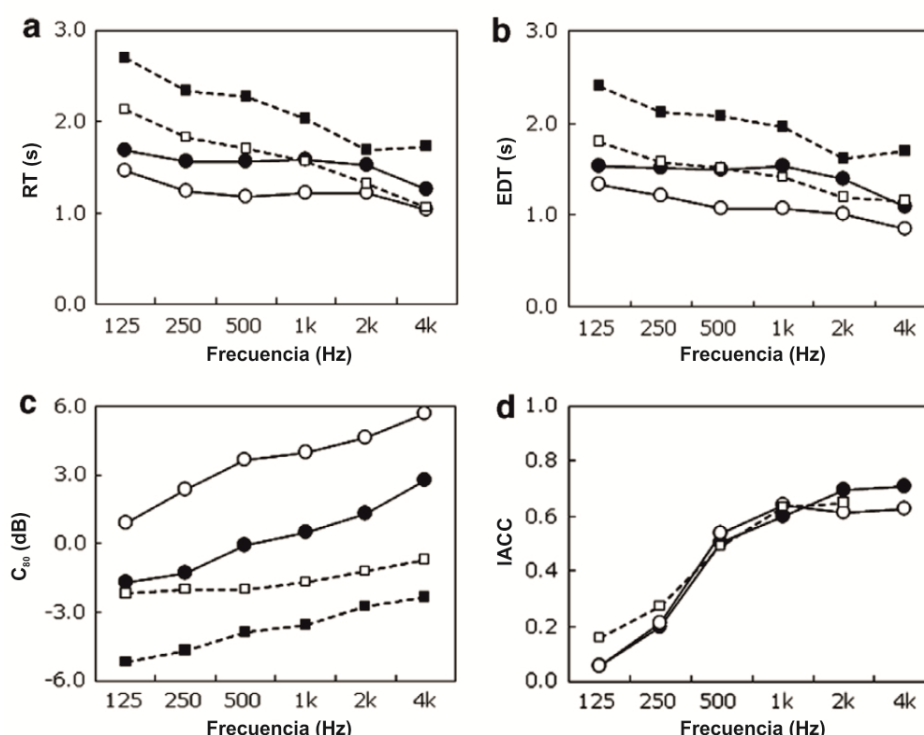


Fig. 6.12. Resultados obtenidos de diferentes parámetros de calidad acústica entre el espacio real (modalidad de concierto ● y opera ○) y el modelo físico a escala (modalidad de concierto ■ y opera □).
(Adaptada de: Yong et al. 2008, p. 623)

Regresando al caso de discusión, se tomó como referencia el hecho de que Yong et al. (2008) hubieran realizado la simulación del modelo físico a escala en un modelo computarizado y así se consideró realizar el mismo ejercicio. Los coeficientes de absorción sonora se mantuvieron igual, pero las dimensiones del espacio, así como de la ubicación de la fuente y receptor se escalaron 1:10. La tabla 6.9 y la figura 6.13 muestran los valores obtenidos en dicha simulación.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN DEL MODELO FÍSICO A ESCALA POR SIMULACIÓN POR COMPUTADORA					
FRECUENCIA	CASO				
	MDF	MDF/CARTÓN CORRUGADO	MDF/CORCHO	MDF/ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE 24 FME	MDF/ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE 50 RF
125 Hz/1 250 Hz	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
250 Hz/2 500 Hz	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04
500 Hz/5 000 Hz	0.10	0.07	0.08	0.06	0.06

Tabla 6.9. RT del modelo físico a escala por simulación por computadora.

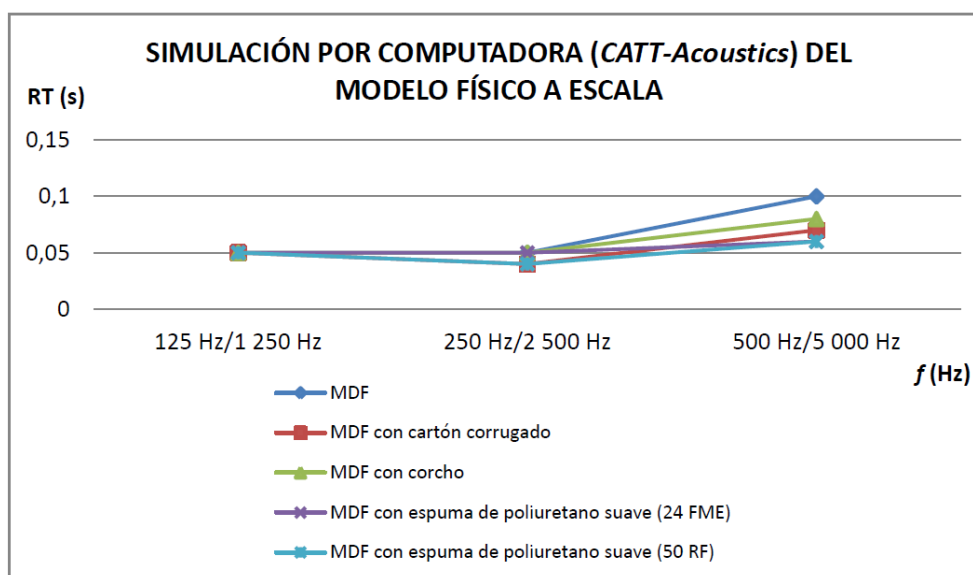


Fig. 6.13. Gráfica comparativa del RT por simulación por computadora del modelo físico a escala.

Los valores obtenidos anteriormente, son comparables con los obtenidos al aplicar la fórmula de Sabine para el caso del modelo físico a escala. En la tabla 6.10 y en la figura 6.14 se muestra dicha comparación.

Es importante resaltar que si los valores obtenidos, que aparecen en la columna A, los multiplicamos por un factor de 10, podemos observar que son comparables con los obtenidos en la simulación por computadora del espacio real, sin embargo en ninguno de los casos anteriores son comparables con los obtenidos en el modelo físico a escala. La tabla 6.11 y la figura 6.15 muestran dicha comparación.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN ENTRE EL MODELO FÍSICO A ESCALA POR SIMULACIÓN POR COMPUTADORA Y LA APLICACIÓN DE LA FÓRMULA DE SABINE AL MODELO FÍSICO A ESCALA										
FRECUENCIA	CASO									
	MDF		MDF/CARTÓN CORRUGADO		MDF/CORCHO		MDF/ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE 24 FME		MDF/ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE 50 RF	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
125 Hz/1 250 Hz	0.05	0.061	0.05	0.057	0.05	0.060	0.05	0.056	0.05	0.052
250 Hz/2 500 Hz	0.05	0.059	0.04	0.047	0.05	0.057	0.05	0.054	0.04	0.043
500 Hz/5 000 Hz	0.10	0.100	0.07	0.072	0.08	0.084	0.06	0.062	0.06	0.062

Tabla 6.10. Comparación del RT entre la simulación del modelo físico a escala por computadora (A) y la aplicación de la fórmula de Sabine para el modelo físico a escala (B).

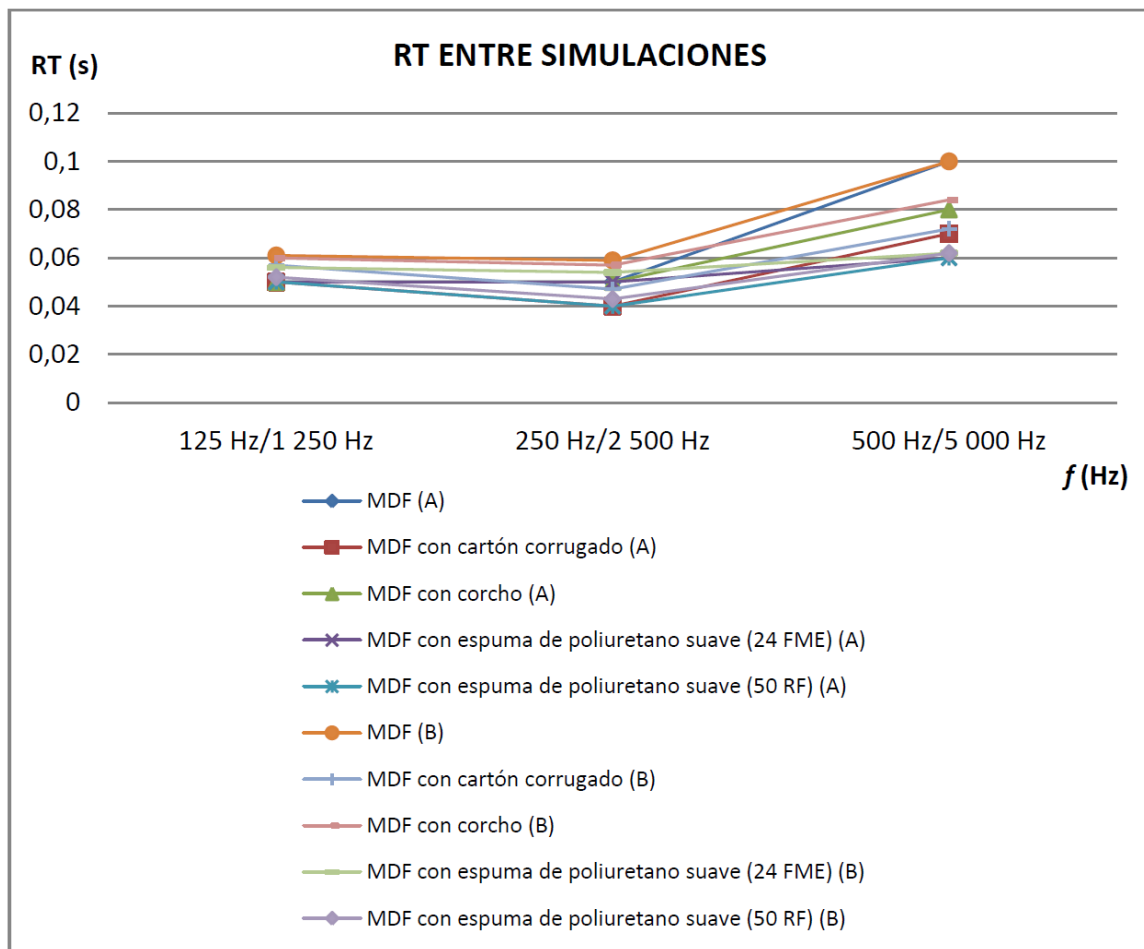


Fig. 6.14. Gráfica comparativa del RT entre la simulación del modelo físico a escala por computadora (A) y la aplicación de la fórmula de Sabine para el modelo físico a escala (B).

TIEMPO DE REVERBERACIÓN ENTRE EL MODELO FÍSICO A ESCALA POR SIMULACIÓN POR COMPUTADORA* Y EL ESPACIO REAL POR SIMULACIÓN POR COMPUTADORA										
FRECUENCIA	CASO									
	MDF		MDF/CARTÓN CORRUGADO		MDF/CORCHO		MDF/ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE 24 FME		MDF/ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE 50 RF	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
125 Hz/1 250 Hz	0.50	0.57	0.50	0.53	0.50	0.56	0.50	0.53	0.50	0.49
250 Hz/2 500 Hz	0.50	0.57	0.40	0.46	0.50	0.55	0.50	0.52	0.40	0.45
500 Hz/5 000 Hz	1.00	1.01	0.70	0.75	0.80	0.85	0.60	0.70	0.60	0.69

* MULTIPLICADO POR UN FACTOR DE 10

Tabla 6.11. Comparación del RT entre la simulación del modelo físico a escala por computadora (A) y el espacio real por simulación por computadora (B).

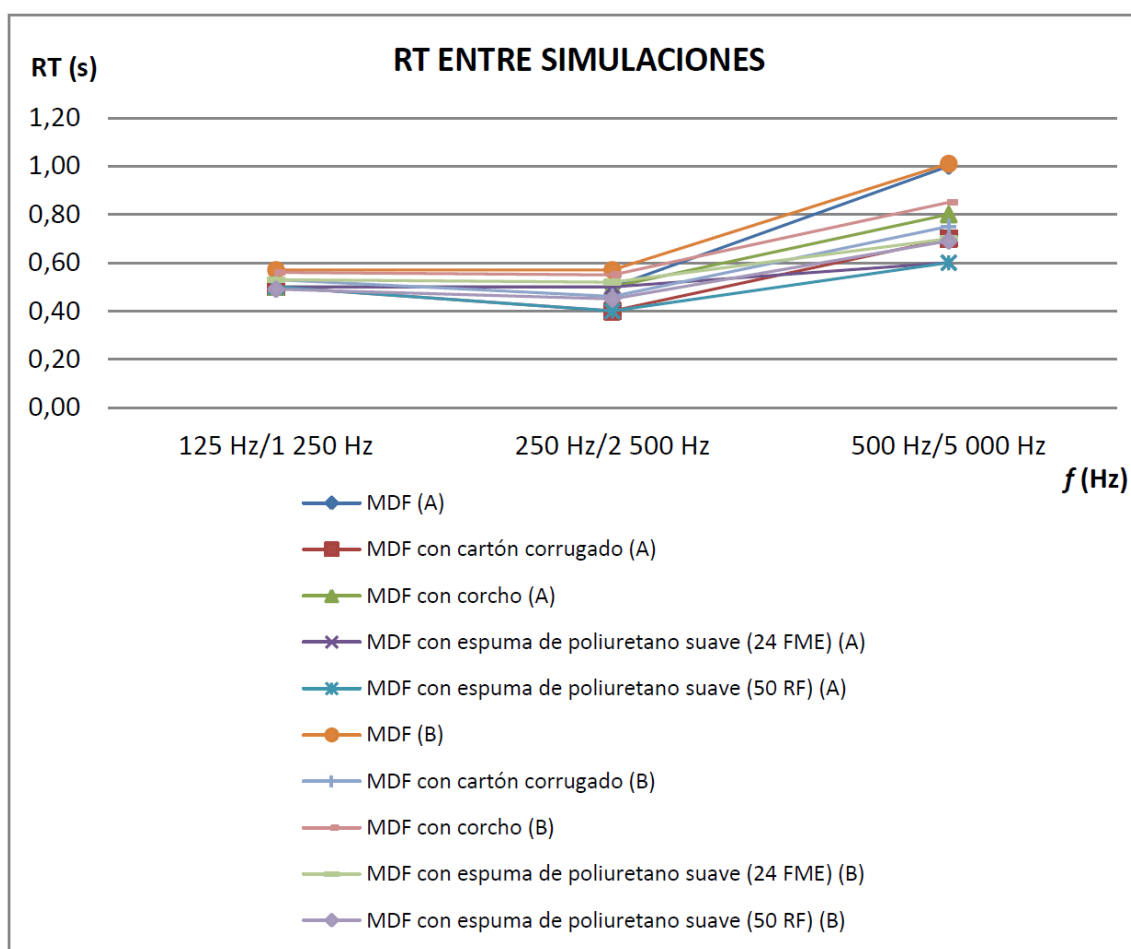


Fig. 6.15. Gráfica comparativa del RT entre la simulación del modelo físico a escala por computadora (A) y el espacio real por simulación por computadora (B).

Este procedimiento supone una correlación de métodos entre la aplicación de la fórmula de Sabine y la simulación por computadora, pero no con la medición en el modelo a escala, ya que los valores obtenidos contemplaron un aumento en un factor de diez.

Ahora bien, se estableció comunicación con uno de los autores (Yong)⁷⁷ acerca del trabajo desarrollado en esta tesis y opinó que la diferencia entre valores puede deberse a los coeficientes de absorción, puesto que se obtuvieron por el método de incidencia normal o direccional a partir de un tubo de impedancias y no por incidencia aleatoria como en una cámara reverberante. Situación que de origen que no había estado contemplada en esta investigación ya que se trata de utilizar el método del tubo de impedancias debido ante todo al escaso espesor de los materiales.

- En relación a lo mencionado por Silva et al. (2008), mencionan que existen dos métodos estándar para la determinación del coeficiente de absorción sonora de los materiales: a partir de un tubo de impedancias y a partir de una cámara reverberante. Dichos métodos se explican con mayor detalle en el Capítulo 4 de esta investigación.

A fin de cotejar la proximidad de los resultados entre ambos métodos, estos autores fabricaron una cámara reverberante a escala real (1:1), otra en miniatura escala 1:10 y un tubo de impedancias con un rango de medición en frecuencias de 125 Hz a 4 000 Hz.

Posteriormente realizaron diversas mediciones en los métodos antes mencionados, de diferentes materiales, tales como: corcho aglomerado negro⁷⁸, espuma de poliuretano y fibra de coco en placa y en rollo⁷⁹. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.16.

⁷⁷ Comunicación establecida mediante correo electrónico el día 7 de noviembre del 2011. En el Anexo 8 se pueden consultar los correos electrónicos de dicha comunicación.

⁷⁸ Se fabrica a base de granulados de corcho aglomerado por presión y cocción prolongada, es por ello que su color es oscuro. Se emplea como aislante térmico y acústico.

⁷⁹ Se utilizan como aislantes acústicos, entre otros usos.

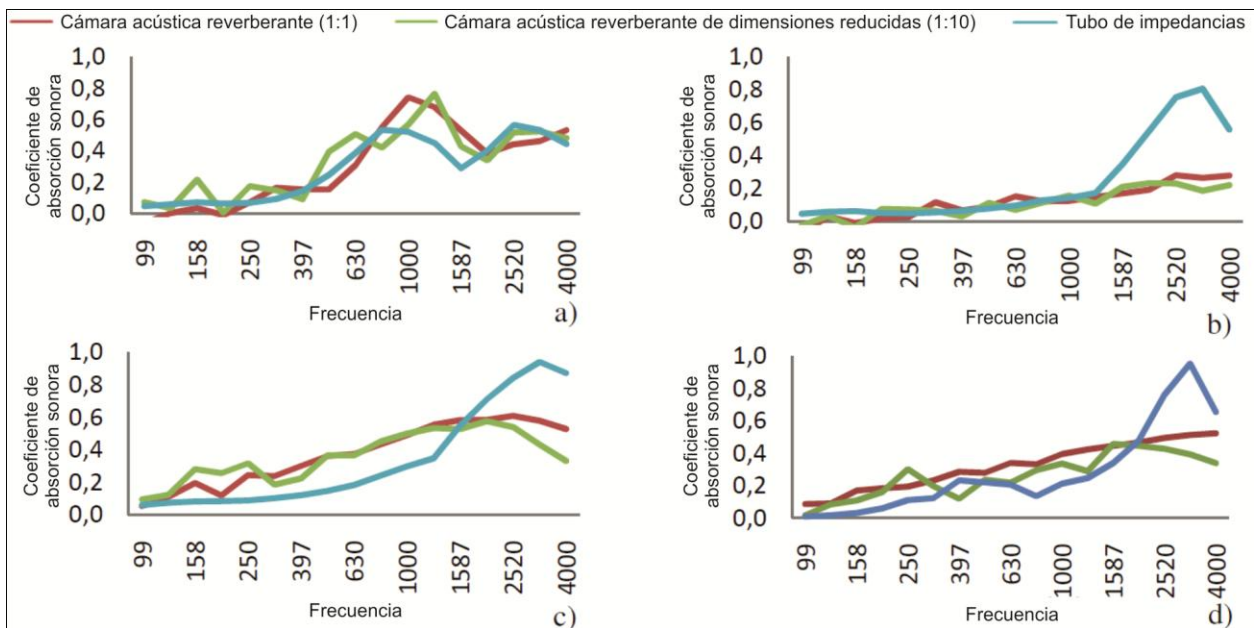


Fig. 6.16. Coeficientes de absorción sonora obtenidos por diferentes métodos para materiales como: (a) corcho aglomerado negro, (b) espuma de poliuretano, (c) fibra de coco en placa y (d) fibra de coco en rollo. (Adaptada de: Silva et al. 2008)

En la figura 6.16 se observa lo siguiente: en el caso del corcho aglomerado, el comportamiento del material es aproximado en todos los métodos, sin embargo el método de cámara reverberante en miniatura presenta un desfase por arriba de los otros dos métodos en frecuencias bajas. Los autores justifican este hecho debido a las frecuencias naturales de vibración de las mismas. Por otro lado, en la gráfica de la espuma de poliuretano se observa un comportamiento similar hasta la frecuencia de 1 000 Hz, ya que después de ésta se obtienen valores superiores con el método de tubo de impedancias. Este fenómeno lo argumentan señalando que el material tiene un mejor comportamiento bajo la influencia de incidencia de ondas de manera directa. En el caso de la fibra de coco en placa, se observa un comportamiento aproximado entre la cámara reverberante a escala real y a escala 1:10, sin embargo en el caso del tubo de impedancias, el coeficiente de absorción decrece en frecuencias bajas, mientras que en frecuencias altas los valores aumentan de manera significativa, mostrando la capacidad de absorción sonora del material para dichas frecuencias en incidencia de ondas directas. Por último la fibra de coco en rollo muestra casi el mismo comportamiento que la fibra de coco en placa.

De acuerdo a lo antes observado, los autores llegaron a la conclusión de que el tipo de campo sonoro influye en el comportamiento de los materiales, como se observa en los materiales porosos y fibrosos (espuma de poliuretano y fibra de coco), los cuales presentan una mejor capacidad de absorción sonora en frecuencias altas cuando la incidencia de ondas es directa a través del método de tubo de impedancias.

Como adición a lo anterior y ya citado en el Capítulo 4 de esta tesis, Llinares et al. (2008, p. 172) indican que la cantidad de energía absorbida depende del tipo de material, de su forma, del espesor y del tipo de montaje, así como del ángulo de incidencia sobre el material y de la frecuencia acústica de estudio.

En el estudio que nos ocupa, es importante señalar que la mayoría de los materiales medidos para esta tesis, tales como papeles, cartones, cartulinas, acrílicos, plásticos y maderas, en fin materiales no muy porosos, presentaron una mejor capacidad de absorción sonora entre las frecuencias de 1 250 Hz a 2 500 Hz, mientras que con las espumas de poliuretano rígidas y duras, se observó una adecuada capacidad de absorción entre las frecuencias de 2 500 Hz a 5 000 Hz, o sea en frecuencias altas. Para ver las gráficas del coeficiente de absorción de los materiales, revise el Anexo 9.

- Con respecto a lo anterior, también podríamos suponer una variación en los valores obtenidos mediante el tubo de impedancias por otros fenómenos debidos al tamaño de las muestras, así como de su colocación en el porta muestras. Por ello es importante referirnos al artículo de investigación de Kino y Ueno (2006), donde realizan una indagación en relación a la obtención del coeficiente de absorción sonora de diferentes muestras de lana de vidrio y fieltro, con diferentes diámetros y colocadas de manera distinta.

Este experimento se realizó en un tubo de impedancias de sección circular con un diámetro interno de 87.5 mm. Posteriormente, prepararon muestras de lana de vidrio y fieltro con los siguientes diámetros: 86.0, 86.5, 87.0, 87.5 y 88.0 mm. Se midió el coeficiente de absorción sonora de algunas muestras solamente, así como otras propiedades acústicas. La figura 6.17 muestra los valores del coeficiente de absorción sonora obtenidos de dichas muestras considerándolas totalmente pegadas al respaldo

del porta muestras y con 20 mm de espacio de aire entre la muestra y la pared del porta muestras.

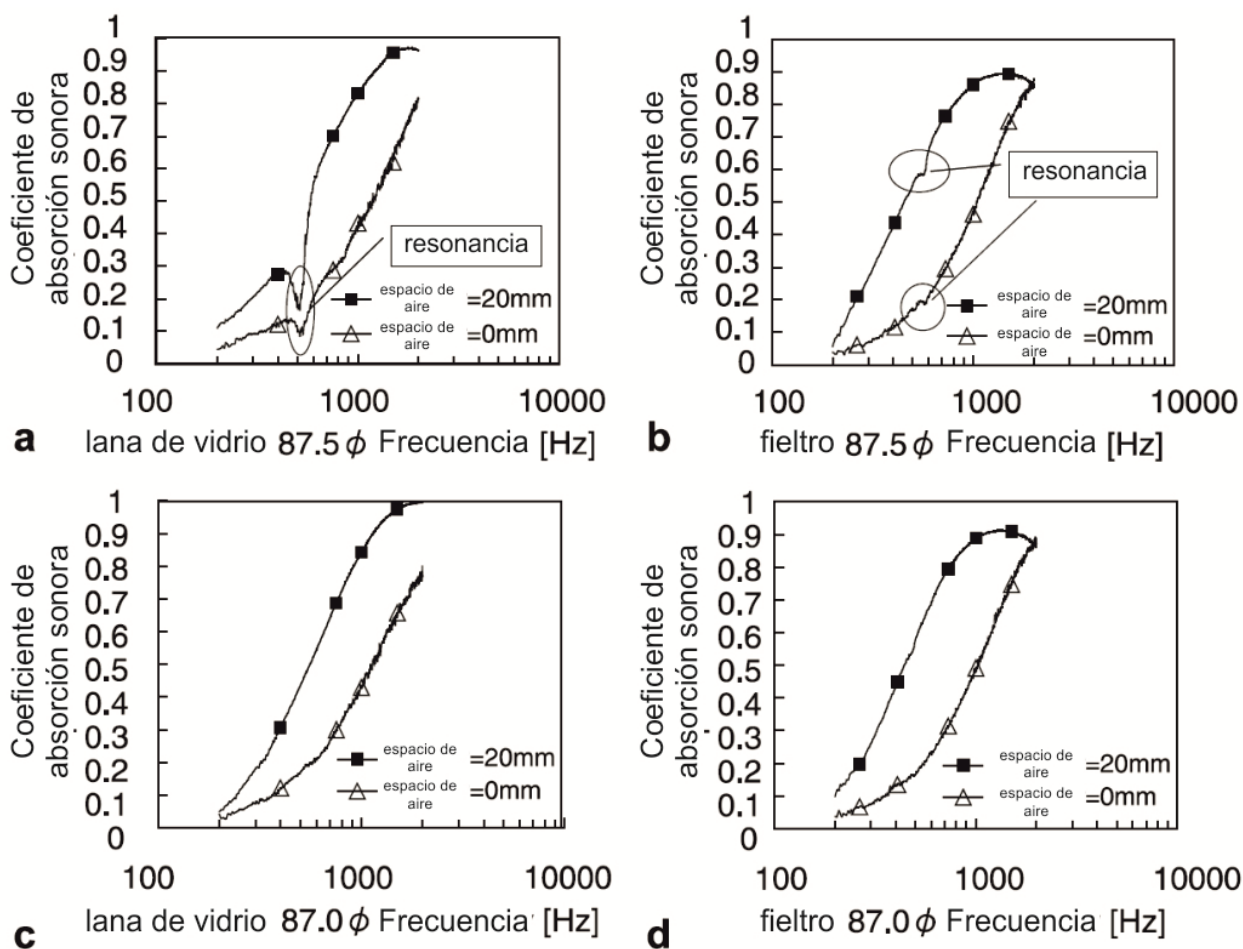


Fig. 6.17. Coeficientes de absorción sonora obtenidos por el método de tubo impedancias de diferentes muestras: (a) lana de vidrio de 87.5 cm de diámetro, (b) fieltro de 87.5 cm de diámetro, (c) lana de vidrio de 87.0 cm de diámetro y (d) fieltro de 87.0 cm de diámetro. (Adaptada de: Kino y Ueno, 2006)

En las gráficas, puede observarse que las muestras con el diámetro exacto al del tubo de impedancias, producen un efecto de resonancia⁸⁰ dentro del tubo en algunas frecuencias, mientras que las muestras que tienen un diámetro menor al del tubo, tienen una trayectoria mucho más homogénea.

⁸⁰ Este fenómeno se explica en el Capítulo 2.

Es importante mencionar que en las mediciones de las otras propiedades acústicas ocurre el mismo fenómeno, por lo que concluyen que si el diámetro de la muestra es mayor al del diámetro interno del tubo de impedancias o bien, la colocación del material queda justa o apretada, se producirá un efecto de resonancia (en su caso este fenómeno ocurrió con las muestras de 87.5 mm y 88.0 mm). Por otra parte, si el diámetro de la muestra es demasiado pequeño en comparación al del tubo, puede haber posibles efectos de pérdida de sonido alrededor del perímetro de la muestra y el tubo.

Finalizan señalando que para deducir propiedades acústicas de los materiales a partir de un tubo de impedancias, es importante considerar el tamaño de la muestra en relación al diámetro interno del tubo, por lo que dicha investigación propone un diámetro óptimo de la muestra, la cual se propone entre 0.5 y 1 mm menor al diámetro interno del tubo, para así minimizar los efectos de resonancia dentro del tubo y reducir las fugas laterales entre el material y la cara interna del tubo.

En el estudio realizado para esta tesis, en relación a lo antes mencionado, puede observarse el efecto de resonancia en algunos materiales en la frecuencia de 700 Hz y entre las frecuencias de 3 500 Hz y 4 000 Hz, estas últimas mucho más evidentes en materiales delgados, donde en algunos casos se obtuvieron valores negativos. La figura 6.18 muestra el ejemplo de la gráfica del coeficiente de absorción de un cartón batería de 1 mm de espesor.

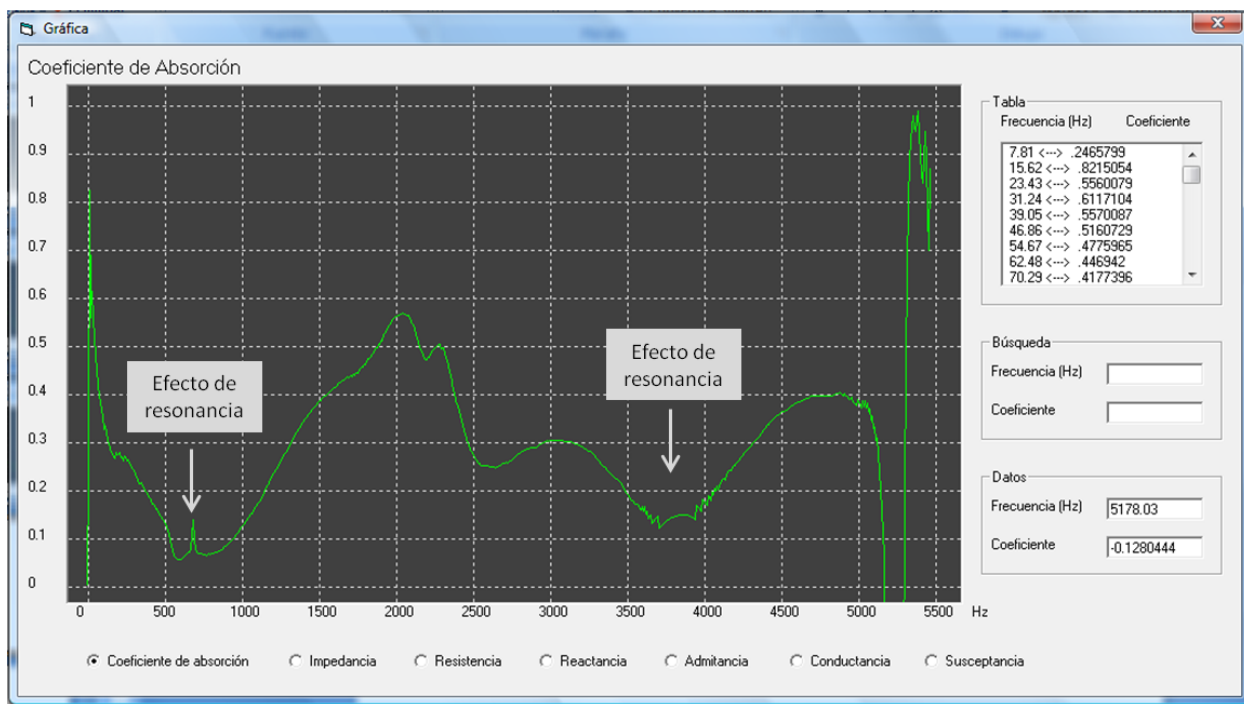


Fig. 6.18. Efecto de resonancia del coeficiente de absorción sonora de un cartón batería de 1 mm de espesor.

En relación a esta discusión, se puede establecer lo siguiente:

- Pareciera que es necesario indagar otras propiedades llamadas acústicas en la ciencia de los materiales, tales como porosidad, tortuosidad, resistencia al flujo, entre otras, para así contar con un mejor panorama en cuanto al comportamiento de los materiales, pues se observó que el coeficiente de absorción sonora en ocasiones no tiene relación con el RT obtenido. Cabe mencionar que esto tiene relación directa con la estructura física del material.
- Resulta complicado encontrar materiales utilizados en modelos a escala que simulen los empleados en la realidad, así como reproducir las características del espacio real en un modelo a escala, pues hay diversos factores que lo dificultan, tales como el tipo de montaje, sobre todo si los valores se obtienen por el método de incidencia normal o directa a través de un tubo de impedancias.

- Los valores obtenidos por tubo de impedancias pudieran tener algunas variaciones en relación a los obtenidos en una cámara reverberante, pues se ha comentado que el campo sonoro, la incidencia de la señal sobre la muestra y el tipo de montaje, influyen en el comportamiento de los materiales.
- Además de lo anterior, el tamaño y colocación de la muestra dentro del tubo de impedancias, pueden influir en los valores del coeficiente de absorción sonora obtenidos, ya que se puede presentar el fenómeno de resonancia en el caso de muestras muy justas con respecto al diámetro del tubo o el efecto de pérdida de sonido cuando las muestras son muy pequeñas.
- Por último, se puede suponer que el problema se encierra en el modelo a escala, pues la simulación por computadora y la aplicación manual de la fórmula de Sabine son comparables, claro, aplicando los coeficientes de absorción sonora obtenidos mediante el tubo de impedancias desarrollado para esta investigación.

RESUMEN GENERAL Y CONCLUSIONES

7. Resumen general y conclusiones

7.1. Introducción

La investigación en acústica arquitectónica es una actividad que día con día nos brinda nuevas posibilidades debido ante todo a la complejidad del fenómeno acústico en los espacios arquitectónicos. Se han diseñado una serie de herramientas para la indagación de las propiedades de los espacios y de los materiales que en ellos se emplean. En esta investigación se optó por el uso de una de las herramientas de mayor utilidad y alcance que es el tubo de impedancias, para conocer los valores de absorción sonora de materiales relativamente frágiles, de estructura ligera y de dimensiones pequeñas, en frecuencias altas. Dentro del Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico (LADAc) ha surgido la posibilidad de construcción de un tubo de impedancias como herramienta para la labor de investigación que en él se realiza y de ello ha partido esta indagación como una aplicación de dicho instrumento a una investigación real.

Es importante remarcar que esta investigación surge a partir de la necesidad del LADAc, en poder lograr la caracterización de la absorción sonora en modelos físicos a escala, pues éstos son empleados para el desarrollo de investigación en el campo de la acústica arquitectónica, en relación a la predicción acústica de los espacios arquitectónicos. Dichos modelos, continúan siendo herramientas imprescindibles para el arquitecto ya que dan la posibilidad de especulación en un espacio supuesto o real, para analizar y estudiar los elementos que lo conforman. No obstante, para el arquitecto especialista en acústica, es una herramienta esencial para estudiar el comportamiento acústico de los espacios arquitectónicos, sin embargo, la absorción, la cual constituye un elemento importante para el control de la acústica de recintos, continua siendo un tema de interés por su impredecible respuesta y caracterización en los modelos físicos a escala.

El desarrollo del experimento de esta investigación se basó en tres elementos fundamentales: desarrollo de un tubo de impedancias, simulación física a escala y simulación por computadora.

7.2. ¿Qué se hizo?

A lo largo de esta investigación se realizó un estudio en relación a la caracterización de la absorción sonora en modelos físicos a escala, para ello se participó, como ya se indicó, en la construcción de un tubo de impedancias con un rango de frecuencia máximo de 5 300 Hz, diseñado en base a la Norma ASTM E1050 – 98, para la obtención del coeficiente de absorción sonora de materiales empleados en modelos físicos a escala. Posteriormente se desarrolló un software especializado para la obtención del coeficiente de absorción sonora.

Se comprobó además el coeficiente de absorción sonora de cinco materiales en un modelo físico a escala, donde se midió el tiempo de reverberación con referencia a la Norma ISO 3382 (1997) utilizando una fuente en miniatura y un micrófono de 1/4". Se diseñó también un software especializado para controlar el Analizador en Tiempo Real NOR 840, con objeto de calcular el RT, y así obtener los resultados de una manera más fácil y rápida.

Se simuló también el espacio real en un programa de simulación acústica por computadora (*CATT-Acoustics V8*), aplicando el valor de los coeficientes de absorción sonora de los materiales obtenidos a través del tubo de impedancias, así como la caracterización de la fuente en miniatura.

Por último se compararon, analizaron y discutieron los resultados obtenidos con las diferentes configuraciones de materiales y métodos empleados.

7.3. ¿Qué se encontró?

En relación a la **obtención de coeficientes de absorción sonora mediante el método de tubo de impedancias**, durante el proceso de medición se observó que los materiales delgados y los lisos, como papeles, cartulinas, cartones, maderas, acrílicos, acetatos, plásticos, entre otros, presentaron mayor absorción entre las frecuencias de 1 750 Hz a 2 250 Hz, mientras que en frecuencias bajas y altas, el coeficiente se mantuvo bajo en la mayoría de los materiales. Por otra parte, los materiales con un espesor mayor a 4 mm y con cierta porosidad, como el cartón corrugado, algunos corchos y espumas de poliestireno expandido, además de MDF cubierto con papeles, pasto artificial para maquetas, entre otros, presentaron un coeficiente de absorción

sonora medio en frecuencias altas y medias, y bajo en frecuencias bajas. Por último, las espumas de poliuretano (porosas) fueron las únicas en presentar un coeficiente de absorción alto en frecuencias altas, y bajo en frecuencias medias y bajas.

Con esto se puede decir que entre más poroso es un material, el coeficiente de absorción sonora aumenta en frecuencias altas.

Por lo anterior se puede señalar que los materiales con cierta porosidad se comportaron mejor ante el tipo de incidencia que se maneja en el tubo de impedancias, sobre todo en frecuencias altas, mientras que con algunos materiales delgados y lisos, se obtuvieron valores negativos en dichas frecuencias.

Observando a detalle las gráficas, se detectaron algunos efectos de resonancia en la frecuencia de 700 Hz y entre las frecuencias de 3 500 Hz y 4 000 Hz, siendo estas últimas más evidentes en materiales delgados y lisos, donde en ocasiones se obtuvieron valores negativos.

Referente a la **comprobación de los coeficientes de absorción sonora de algunos materiales mediante un experimento en un caso de estudio, utilizando un modelo físico a escala**, se observó en los resultados obtenidos en relación al tiempo de reverberación que el corcho y el cartón corrugado, tuvieron un comportamiento similar entre sí, sobre todo en las frecuencias que van de 1 250 Hz a 10 000 Hz, lo que era de esperarse pues el comportamiento del coeficiente de absorción sonora en ambos casos fue semejante, sin embargo, el cartón corrugado tuvo un RT ligeramente menor en relación al corcho, lo que resulta lógico, pues su coeficiente de absorción sonora fue relativamente mayor al del corcho, ya que la absorción se comporta de manera inversamente proporcional al RT y viceversa.

En el caso del MDF, el RT fue considerablemente mayor en la frecuencia de 1 000 Hz y fue disminuyendo en cuanto avanzaba la frecuencia, correspondiente al comportamiento del coeficiente de absorción sonora, donde en la frecuencia de 1 000 Hz el coeficiente fue bajo y alto en las siguientes frecuencias. Sin embargo, el RT obtenido entre las frecuencias de 2 500 Hz a 10 000 no fue el esperado según el comportamiento observado en el coeficiente de absorción sonora, ya que durante estas frecuencias el coeficiente se mantuvo bajo, esperando así un RT alto, lo cual no fue así.

Por último, las espumas de poliuretano tuvieron un comportamiento similar en relación al RT entre las frecuencias de 2 000 Hz a 10 000 Hz y con valores demasiado cercanos, lo cual no se esperaba pues el coeficiente de absorción sonora de la espuma tipo 50 RF siempre fue más alto que la de tipo 24 FME, un ejemplo de ello se observa en la frecuencia de 4 500 Hz, donde el RT entre ambos casos es el mismo, sin embargo, el coeficiente de absorción sonora de la espuma tipo 50 RF es de 0.86 y el de la espuma tipo 24 FME es de 0.67, para esa frecuencia.

Continuando con el caso de las espumas, hubo un valor de RT inesperado en ambos casos en la frecuencia de 1 000 Hz, donde el RT de la espuma tipo 50 RF fue de 0.06 segundos y el de la espuma tipo 24 FME fue de 0.28 segundos, lo cual resulta ilógico, pues el coeficiente de absorción sonora en ambos casos es casi el mismo; 0.24 y 0.22 respectivamente.

En el caso de la **comprobación de los coeficientes de absorción sonora de algunos materiales mediante un experimento en un caso de estudio, utilizando un modelo de simulación por computadora**, se observó que los resultados del tiempo de reverberación obtenidos a partir de la simulación por computadora, tuvieron un comportamiento esperado en relación a los coeficientes de absorción sonora incluidos en el software, por lo que si el coeficiente era bajo, el RT resultaba alto y viceversa. Un ejemplo de lo antes mencionado se observa en las simulaciones del MDF y la espuma de poliuretano suave, tipo 50 RF; donde para el caso del MDF, los coeficientes asignados fueron 0.26, 0.27, 0.16, 0.16, 0.16 y 0.16 para las frecuencias de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz y 4 000 Hz respectivamente y para el caso de la espuma de poliuretano suave, tipo 50 RF, los coeficientes fueron 0.53, 0.91, 0.77, 0.77, 0.77 y 0.77 para las mismas frecuencias. Resultando así el RT más alto para la simulación con MDF y el más bajo para la simulación con espuma de poliuretano suave, tipo 50 RF.

Una vez observadas las situaciones presentadas en cada etapa del experimento, se realizó una comparación en relación al **tiempo de reverberación entre los modelos físicos a escala y las simulaciones por computadora**, encontrándose diferencias entre ambos casos, situación no esperada, debido a que se presentó una similitud de valores o comportamiento entre el modelo físico a escala y la simulación por computadora, como en el caso de Garay (2010), aunque ella trabajó con superficies difusoras y coeficientes de absorción sonora conocidos.

Por otra parte, se observó que al aplicar la fórmula de Sabine de manera manual, utilizando los coeficientes de absorción sonora obtenidos mediante el tubo de impedancias, hay una correlación de datos con la simulación por computadora.

7.4. Conclusiones

La hipótesis al inicio de esta investigación mencionaba lo siguiente:

Existen materiales con coeficientes de absorción sonora en las frecuencias altas que pueden simular en modelos a escala el coeficiente de absorción sonora en frecuencias medias de materiales comunes a escala real.

Con el desarrollo de la maestría y la asesoría metodológica del curso que recibí en la UEA Seminario de Metodología para la Investigación, ésta se amplió a lo siguiente:

- La causa por la que no puedan realizarse mediciones confiables en modelos físicos a escala con materiales absorbentes utilizados en escalas reales, se debe a que las características físicas del material, del sonido y de las condiciones del espacio; no pueden ni deben ser las mismas a diferentes escalas, y por lo tanto las características acústicas como el coeficiente de absorción es diferente.
- Las características de la absorción de los materiales absorbentes dependen no sólo de sus propiedades físicas, sino de un sinnúmero de condicionantes y de detalles constructivos, que varían sustancialmente de un caso a otro y que no se pueden representar mediante una expresión matemática. Es por ello que, para realizar cualquier diseño acústico, resulta imprescindible disponer de los coeficientes de absorción α obtenidos mediante ensayos de laboratorio, según un procedimiento homologado (norma ISO 354/UNE-EN 20354⁸¹), (Carrión, 1998, p.72).

⁸¹ Norma que habla de la medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.

Hipótesis particulares

- Hoy día no existe una relación de materiales que puedan simular diversos coeficientes de absorción sonora en frecuencias altas para aplicarse en modelos a escala. Generalmente los datos de absorción sonora se presentan entre los 125 Hz y los 4 000 Hz y quedan fuera las frecuencias altas de 5 000 Hz en adelante, las cuales se utilizan en modelos a escala.
- Las características del sonido no pueden ni deben las mismas en diferentes escalas a sus diferentes frecuencias de sonido, ya que el sonido de una frecuencia determinada se caracteriza por ser una vibración periódica, es decir, es un fenómeno que se repite en intervalos de tiempo iguales⁸².
- Las condiciones del espacio en las que se realizan las mediciones pueden manipular los resultados, cambiarlos o interferir con ellos. Por lo que, si las mediciones se realizan en un espacio reverberante, éste afectará el número de reflexiones y si se realiza en un espacio absorbente, el tiempo de reverberación resultará bajo y no habrá reflexiones.

De lo enunciado en la sección anterior, en cuanto a lo que se observó, tenemos que:

En relación a la obtención de los **coeficientes de absorción sonora**, se puede decir que:

- **El coeficiente de absorción sonora de los materiales es relativo** – El coeficiente de absorción sonora de los materiales, el cual se obtiene por diversos métodos no es consistente en todos, como lo demuestran Silva et al. (2008) al medir el mismo material en una cámara reverberante en miniatura, en una cámara reverberante a escala real y en un tubo de impedancias. Por lo anterior, es posible considerar que se trata de situaciones relativas debidas a las condiciones de medición y ambiente de las mismas

⁸² Por ejemplo, un sonido de 10 Hz sólo produce en el oído humano 10 vibraciones o perturbaciones en un segundo, lo que significa que una frecuencia más alta producirá mayor perturbación y viceversa en una más baja.

(tipo de material, forma, espesor, tipo de montaje y tamaño de la muestra, así como del ángulo de incidencia de la señal sobre la muestra).

Por otra parte y aunado a lo anterior, es importante señalar que el método de cámara reverberante en miniatura aún no es un método normalizado, sin embargo éste se ha empleado en diversas investigaciones (Spring et al., BBC, 1971; Harwood et al., BBC, 1972; Barron y Coleman, 2000; Silva et al. 2008 y Yong et al. 2008) como una alternativa de solución a los dos métodos más conocidos para la obtención del coeficiente de absorción sonora de los materiales que son el método de cámara reverberante (ISO 354), el cual requiere el uso de muestras de dimensiones grandes (de 10 m^2 a 12 m^2) en un espacio grande (de 150 m^2 a 200 m^2), lo que puede resultar impráctico; y el método de tubo de impedancias (ASTM E1050), el cual requiere el uso de muestras de dimensiones pequeñas (usualmente de 2" a 3"), motivo por el cual no puede ser empleado en todos los materiales, además de dificultar la simulación de un cierto tipo de montaje a escala real.

Ligado a lo anterior, es importante aclarar que resultaría complicado medir algunos de los materiales empleados en modelos físicos a escala dentro de una cámara reverberante, debido a su reducido espesor, como es el caso de los papeles, las cartulinas, maderas delgadas, entre otros, así como al contrario resultaría el tratar de medir materiales empleados en la vida real en un tubo de impedancias, como un tabique por ejemplo.

Por último, según algunos autores (Olynyk y Northwood, 1965 y Pérez, 1989), el tubo de impedancias es un método bastante preciso debido a que su campo sonoro está más controlado en relación a una cámara reverberante, además de ser un método normalizado.

- **El coeficiente de absorción sonora en ocasiones no tiene relación con el tiempo de reverberación de un espacio a escala** – Desde siempre, se ha relacionado el RT de un espacio con el coeficiente de absorción sonora de cada material que lo conforma, pues este indica la cantidad de energía (sonido) absorbida por dicho material. Sin embargo, en esta investigación, cuando nos referimos a modelos a escala, se observó

que en ciertas ocasiones no es así, como es en el caso de las espumas de poliuretano, las cuales obtuvieron un RT muy cercano entre las frecuencias de 4 000 Hz a 10 000 Hz en el modelo físico a escala, y los coeficientes de absorción sonora de ambas es completamente distinto, pues el NRC de una espuma se catalogó como muy absorbente y el otro como medianamente absorbente.

Por lo anterior resulta necesario indagar en otras propiedades llamadas acústicas en la ciencia de los materiales, tales como porosidad, tortuosidad, resistencia al flujo, entre otras, pues como menciona Juliá (2008) estos también son parámetros que caracterizan acústicamente a un material.

En relación a la **simulación en modelos físicos a escala y modelos de simulación por computadora, para predecir el tiempo de reverberación**, se puede decir que:

- **Entre más poroso⁸³ sea un material, mayor desfase de valores se presenta** – Si observamos los resultados del tiempo de reverberación obtenidos de la figura 6.1 a 6.5, entre más poroso son los materiales, mayor desfase de valores se presentan entre el modelo de simulación por computadora y el modelo físico a escala. Se puede observar que por el contrario, si nos referimos al trabajo de Garay (2010), hay correlación de resultados cuando se trabaja con superficies reflejantes y difusoras.
- **El uso de materiales absorbentes en modelos físicos a escala no es aún recomendable** – Como ya se ha comentado, la absorción constituye uno de los elementos importantes para el control de la acústica de recintos, sin embargo su comportamiento aún es impredecible en modelos físicos a escala, es por ello importante continuar con la labor de investigación en cuanto a métodos que puedan comprobar el uso de materiales absorbentes en modelos físicos a escala, para ello es necesario profundizar y estudiar otras propiedades acústicas de los materiales que nos brinden un mejor panorama en cuanto al comportamiento acústico de los mismos.

⁸³ Apreciación visual

Así al realizar simulaciones en modelos físicos a escala, como de salas de concierto, teatros, entre otros, sólo se recomienda donde ni la audiencia, o material absorbente alguno se considere.

- **Es conveniente el uso de modelos físicos a escala, pues tienen una ventaja esencial: el sonido es real** – En este punto, se hace hincapié en la utilización de modelos físicos a escala, pues la fuente sonora empleada en ellos es sonido real y por lo tanto su comportamiento también lo es, lo que lo convierte en el recurso más cercano a la realidad.

En el Capítulo 1, se describen algunos de los procesos de simulación acústica de los espacios, utilizados para predecir el comportamiento del sonido dentro de los mismos, así mismo, también se describen las características, ventajas y desventajas de dichos procesos, entre ellos la utilización de modelos físicos a escala y modelos de simulación por computadora, sin embargo es importante remarcar que el uso de modelos físicos a escala se sigue utilizando de forma paralela a las simulaciones por computadora, debido a que estas últimas presentan limitaciones en cuanto a efectos de dispersión, comportamiento de difracción y limitaciones en el modelado de algunos elementos con formas irregulares complejas (Ahnert et al. 2003).

Puede decirse entonces que los valores esperados en el modelo físico a escala no se obtuvieron conforme a lo esperado probablemente debido a factores asociados con la obtención del coeficiente de absorción sonora, tales como al método empleado (incidencia de la señal sobre la muestra), condiciones de medición y ambiente de las mismas, así como las características de las muestras (tipo de material, forma, espesor montaje y tamaño).

Sin embargo, es necesario continuar con la labor de investigación en relación a la caracterización de la absorción sonora en modelos físicos a escala, pues el manejo de este método garantiza la utilización de fuentes sonoras reales y por lo tanto el comportamiento del sonido se da en forma natural. Para ello se proponen en la sección a continuación algunas líneas de investigación como una posible solución a la caracterización de la absorción sonora en modelos físicos a escala.

7.5. ¿Qué falta por hacer?

Se ha visto a lo largo de esta investigación y con el apoyo de algunos artículos de investigación que la caracterización de la absorción sonora en modelos a escala resulta bastante complicada, además de la exacta reproducción de las características del espacio real en un modelo a escala. Sin embargo, si se pretende continuar con la labor de predecir el comportamiento de un espacio a partir de un modelo físico a escala, y que éste contemple elementos absorbentes, se pueden plantear nuevas investigaciones relacionadas con las siguientes temáticas:

- Indagar en otras propiedades acústicas, tales como porosidad, resistencia al flujo, impedancia, entre otras, que puedan obtenerse por el método de tubo de impedancias y que a su vez puedan relacionarse con el tiempo de reverberación.
- Considerar la fabricación de una cámara reverberante en miniatura (aunque es un método aún no normalizado) y comparar los coeficientes de absorción sonora de materiales empleados en modelos físicos a escala, con los obtenidos mediante el tubo de impedancias, además de comprobar dichos materiales en un modelo físico a escala mediante la obtención del tiempo de reverberación.

Considerando las hipótesis establecidas al inicio de esta investigación, es aún difícil determinar los materiales empleados en modelos físicos a escala que puedan simular los de un espacio real, en términos de un comportamiento acústico.

Por otra parte y en relación a las características físicas del material, del sonido y del espacio, es importante mencionar que estas dos últimas se escalaron satisfactoriamente, sin embargo, las del material no, por lo que una nueva hipótesis y relacionada con la primer línea de investigación se puede plantear como: *“Existen propiedades acústicas de materiales, empleados en modelos físicos a escala, distintas del coeficiente de absorción sonora, que pueden ayudar a predecir el comportamiento de la absorción sonora de dichos materiales para simular los empleados en un espacio real”*.

Otra hipótesis relacionada con las características de absorción sonora de los materiales y su método de obtención y que se liga con la segunda línea de investigación, puede plantearse

como: *“El coeficiente de absorción sonora de materiales empleados en modelos físicos a escala, puede calcularse a partir del método de cámara reverberante en miniatura y puede compararse con el de materiales empleados a escala real”*

7.6. Epílogo

Al inicio de esta investigación se pensó en la posibilidad de desarrollar una base de datos de materiales empleados en modelos físicos a escala que ayudaran a alumnos de arquitectura, así como a arquitectos, para la selección del material adecuado para la elaboración de dichos modelos, con objeto de simular y predecir del comportamiento acústico de un espacio real desde el punto de vista de la acústica arquitectónica, a partir de métodos normalizados sin embargo esto no se logró.

Durante esta investigación se profundizó en el tema de absorción sonora, se comprendió dicho fenómeno y se conocieron los métodos para su obtención. Así mismo, se indagó en la importancia de la absorción sonora como elemento esencial para el control de ruido en los espacios.

Considero importante continuar con la labor de investigación en relación a la absorción sonora en modelos físicos a escala, indagar más en relación a los métodos para su obtención y en otras propiedades acústicas que puedan aportar mayor información en relación al comportamiento de los materiales. Es importante mencionar que la absorción continua siendo una herramienta indispensable para el arquitecto especialista en acústica.

Es por ello que esta tesis hace una aportación importante en relación a los métodos existentes para la obtención del coeficiente de absorción sonora y a la experimentación en modelos físicos a escala con materiales empleados esencialmente para este fin, tema que ha sido original para esta investigación y sin embargo le hace falta mucho más indagación.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

Libros

Arau, H. (1999). *ABC de la Acústica Arquitectónica*. Barcelona, España: ceac.

Carrión, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos* (Primera ed.). Barcelona, España: UPC (Universidad Politécnica de Catalunya).

Cowan, J. (1994). *Handbook of Environmental Acoustics*. Nueva York, EE. UU.: VNR (Van Nostrand Reinhold).

Doelle, L. (1972). *Environmental Acoustics*. Nueva York, EE. UU.: McGraw Hill.

Egan, D. (1988). *Architectural Acoustics*. Nueva York, EE. UU.: McGraw Hill.

Everest, A. y Pohlmann, K. (2009). *Master Handbook of Acoustics* (Quinta ed.). Nueva York, EE. UU.: Mc Graw Hill.

Harris, C. M. (1995). *Manual de medidas acústicas y control de ruido* (Tercera ed.). México: Mc Graw Hill.

Knoll, W. y Hechinger, M. (2001). *Maquetas de arquitectura* (Quinta ed.). Edo. Mex., Naucalpan, México: Gustavo Gili.

Llinares, J., Llopis, A. y Sancho, J. (2008). *Acústica Arquitectónica y Urbanística* (Primera ed.). D.F., México: LIMUSA.

Sánchez, G. (2004). *Guía de investigación para niños interesados en problemas urbanos y en otras cuestiones* (Primera ed.). D.F., México: Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco y Miguel Ángel Porrúa.

Thompson, E. (2002). *The soundscape of modernity: architectural acoustics and the culture of listening in America, 1900 - 1933*. Londres, Inglaterra: MIT Press.

Werner, M. (2011). *Model Making* (Primera ed.). Nueva York, EE. UU.: Princeton Architectural Press.

Artículos de investigación en revistas y congresos especializados

Addis, B. (Mayo de 2009). A Brief History of Design Methods for Building Acoustics. *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*.

Addis, B. (2006). The Use of Scientific Calculations in Design Procedures for Heating, Ventilation, Daylighting and Acoustics from the Eighteenth Century to the mid-Twentieth Century. *Second International Congress on Construction History. Cambridge University*, 1, págs. 127 - 151. Reino Unido, Gran Bretaña.

Ahnert, W., Feistel, S, y Schmitz, O. (25 - 29 de Agosto de 2003). Modern tools in acoustic design of concert halls and theatres, use and limitations of computer simulations and auralisation. *XIII Session of the Russian Acoustical Society*, 863 - 874.

Alba, J., et al. (2006). Criterios de selección de materiales acústicos absorbentes con técnicas basadas en tubo de kundt. *TecniAcústica*.

Arizo, J., Picard, M. y Solana, P. (2000). Estudio acústico y espesor de materiales absorbentes fibrosos porosos estratificados comerciales. *TecniAcústica*.

Beranek, L. (1942). Acoustic impedance of porous materials. *Journal of the Acoustical Society of America*, 13, 248 - 260.

Carvalho, A. y Lencastre, M. (2002). Absorção Sonora de Retábulo em Talha Barroca. *Revista Estudos Património - IPPAR*, 3, 14 - 18.

Castañeda, J. y González, H. (2004). Medición del coeficiente de absorción del sonido. *Scientia et Technica*, X (25), 101 - 106.

Díaz, C. (1997). Sobre la utilización de los coeficientes de absorción de los materiales en la expresión de Eyring del tiempo de reverberación de una sala. *Revista de Acústica*, XVIII (3 y 4), 66 - 67.

Frigg, R. y Hartmann, S. (27 de Febrero de 2006). Models in Science. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*.

Gimenez, A. y Marin, A. (1987). Estudio y selección de parámetros calificadores de salas de concierto. *Revista de Acústica*.

Gonchar, J. (Febrero de 2011). Virtual but Vivid. A sonic rendering technique known as auralization helps acousticians make the sound of even unrealized spaces tangible. *Architectural Records*, 109 - 113.

González, J., Cesteros, B. y Cordero, R. (2006). Caracterización de propiedades intrínsecas acústicas de materiales porosos mediante métodos indirectos. *TecniAcústica*.

González, J., et al. (2008). Propiedades acústicas intrínsecas de los asfaltos porosos: porosidad, tortuosidad y resistividad al flujo estático de aire. Diseño óptimo de un asfalto. *Acústica*.

González, J., Martín, J. y Sánchez, A. (2005). Método para la simulación acústica de las medidas con tubo de impedancia y cabina alpha de materiales multicapa. *TecniAcústica*.

Harwood, H. D., Burd, A. N. y Spring, N. F. (1972). Acoustic Scaling: An evaluation of the proving experiment. *BBC, Research Department, Engineering Division*, Londres.

Harwood, H. D. y Burd, A. N. (1970). Acoustic Scaling: General Outline. *BBC, Research Department, Engineering Division*, Londres.

Harwood, H. D., et al. (1974). Acoustic Scaling: Examination of possible modifications to Maida Vale Studios No. 1. BBC, Research Department, Engineering Division, Londres.

Harwood, H. D., Randall, K. E. y Landsdowne, K. F. L. (1975). Acoustic Scaling: the design of a large music studio for Manchester - Interim Report. *BBC, Research Department, Engineering Division*, Londres.

Harwood, H. D., Randall, K. E. y Landsdowne, K. F. L. (1975). Acoustic Scaling: the design of a large music studio for Manchester - Final Report. *BBC, Research Department, Engineering Division*, Londres.

Hothesall, D. C., et al. (Noviembre 1999). Scale modelling of railway noise barriers. *Journal of Sound and Vibration*, 207 - 223.

Horoshenkov, K. V., Hothersall, D. C. y Attenborough, K. (1995). Porous materials for scale model experiment in outdoor sound propagation.

Juliá, E., et al. (2006). Incertidumbre en la medida de la resistencia al flujo con el método de Ingard y Dear. *TecniAcústica*.

Kino, N. y Ueno T. (2006). Investigation of sample size effects in impedance tube measurement. *Applied Acoustics* (68), 1485 - 1493.

León, A., et al. (2007). Acústica y rehabilitación en teatros de Andalucía. Sevilla, España: *Universidad de Sevilla*.

Mathers, C. D. (1981). Acoustic Scaling: A review of progress to date, and of possible future development. *BBC, Research Department, Engineering Division*, Londres.

Pérez, A. (Abril de 1989). Absorción y Aislamiento Acústico. *Jornadas Nacionales de Acústica. Enviromental Acoustics* , 371 - 398.

- Pérez, S. y Loera, G. (2000). Extendiendo las capacidades de medición del tubo de impedancias del centro de instrumentos, UNAM. *Revista Mexicana de Física*.
- Pfretzschner, J., et al. (5 - 7 de Noviembre de 1997). Estudio teórico experimental de materiales granulares absorbentes preparados con granza de caucho. *TecniAcústica* , 285 - 288.
- Rindel, J. H. (10 de Septiembre de 2000). The Use of Computer Modeling in Room Acoustics. *Journal of Vibroengineering*, 219 - 224.
- Rossell, I. y Arnet, I. (Septiembre de 2002). Theoretical and practical review of reverberation formulae for rooms with non homogenyc absorption distribution. *Forum Acusticum*.
- Scott, R. (1945). The absorption of sound in a homogeneous porous medium. *Proceedings of the Physical Society* , 58 (2), 165 - 183.
- Silva, J., Godinho, L. y Pereira A. (Octubre de 2008). Determinação experimental da absorção sonora de materiais utilizando amostras de dimensões reduzidas. *Acústica*.
- Spring, N. F., Randall, K. E. y Smith, M. K. E. (1971). Acoustic Scaling: A one eighth scale model reverberation room. *BBC, Research Department, Engineering Division*, Londres.
- Stettner, A. y Greenberg, D. (31 - 4 de Julio - Agosto de 1989). Computer Graphics Visualization for Acoustic Simulation. (J. Lane, Ed.) *SIGGRAPH '89 Proceedings*, 195 - 206.
- Olynyk, D. y Northwood, T. D. (1965). Comparison of reverberation room and impedance tube absorption measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 36 (11), 2171 - 2174.
- Ushiyama, A., et al. (Febrero 2005). Reverberation characteristics in a room with unevenly-distributed absorbers: Scale modeling study. *Acoust. Sci. & Tech*, 26 (4), 391 - 393.
- Walker, R. (1984). *Acoustic Scaling: A re-evaluation of the acoustic model of Manchester, Studio 7*. *BBC, Research Department, Engineering Division*, Londres.

Yong, J., et al. (2008). Influence of absorption properties of materials on the accuracy of simulated acoustical measures in 1:10 scale model test. *Applied Acoustics* (70), 615 - 625.

Textos académicos

Álvarez, O. F. (2010). *Método Normalizado de Medición Automática de las Propiedades Acústicas de Materiales*. Trabajo Terminal de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, U.P.I.I.T.A., México, D.F.

Garay, E. (2010). *Análisis del impacto de la difusión sonora en la reverberación de un espacio arquitectónico*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco, División de Ciencias y Artes para el Diseño, Maestría en Diseño, México, D.F.

González, L. (2009). *Simulación de las características acústicas del espacio arquitectónico en modelos físicos a escala*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco, División de Ciencias y Artes para el Diseño, Maestría en Diseño, México, D.F.

Juliá, E. (2008). *Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Rodríguez, F. (2011). *Propuesta de un modelo para la predicción del carácter acústico del espacio arquitectónico*. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco, División de Ciencias y Artes para el Diseño, Maestría en Diseño, México, D.F.

Normas

ASTM International E1050 - 98 - Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System.

ISO 354:2003 (E) - Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room (Segunda ed.).

ISO 3382:1997 (E) - Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters (Segunda ed.).

Referencias electrónicas

Acoustic Ceiling Tiles, 2008. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.acousticalceilingtiles.com/>

Aescala taller Maquetas, s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.aescalamaquetas.com/>

Alava Ingenieros, 2012. Fecha de consulta: febrero 2012.

<http://www.alava-ing.es/>

Am maquetas arquitectónicas, 2011. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://architecturalmodels.blogspot.mx/>

Angelo Farina's Home Page, s/f. Fecha de consulta: febrero 2012.

<http://pcfarina.eng.unipr.it/>

Anto B. Ortiz Cercós, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://unidadjantonioortiz.blogspot.mx/>

ArchiExpo (el salón virtual de la arquitectura) s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.archiexpo.es/>

Archiseek, 2012. Fecha de consulta: febrero 2012.

<http://archiseek.com/>

Architectural Scale Model (people and miniature models), 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.architectural-scalemodel.com/>

Archivisionmodels (architectural models, scale model, wood model and model maker), s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.archivisionmodels.com/>

Art Store (papers drawing, papers accademia), 2011. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.artstoreonline.com.au/>

Artkitech (maquetas arquitectónicas), 2009. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.artkitech.es/>

ArtStore, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.artstore.co.uk/>

AvaxHome - EASE 4.1.0.7 (electro-acoustic simulator for engineers), 2010. Fecha de consulta: febrero 2012.

http://avaxhome.ws/software/software_type/scientific/Engineering/Simulator.html
B&C SPEAKERS, s/f. Fecha de consulta: diciembre 2011.
<http://www.bcspeakers.com/>
Banema, 2009. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.banema.pt/>
Biografías y Vidas, 2012. Fecha de consulta: diciembre 2011 a marzo 2012.
<http://www.biografiasyvidas.com/>
BondTape (cintas adhesivas y láminas), s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.bondtape.es/>
Bozovich, s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.bozovich.com/>
C2F, Inc, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.c2f.com/>
CATT – Acoustic. Fecha de consulta: febrero 2012.
<http://www.acousticfield.jp/product/cattacoustic.html> (2011)
<http://www.catt.se/> (2012)
Certain Teed, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.certainteed.com/>
Consmos group, 2009. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.consmos.com/>
CR/ Estudio de Arquitectura, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://maquetas-profesionales.blogspot.mx/>
Craftzine - Craft, 2010. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://blog.craftzine.com/>
Decustik, 2011. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.decustik.com/>
Difoto, s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.difoto.es/>
DirectIndustry (el salón virtual de la industria), s/f. Fecha de consulta: diciembre 2011.
<http://www.directindustry.com/>
Drywall, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.drywall.com.ve/>
EBAWE (Anlagentechnik GmbH), s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.ebawe.de/es/>

Eduardo Iberico, 2011. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://eduardoiberico.wordpress.com/>

Elina Busmane Blog, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://elinabusmane.wordpress.com/>

Emestext, s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.emestext.com/>

FiberGlass Colombia SA, 2006. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.fiberglasscolombia.com/>

Flickr, 2012. Fecha de consulta: enero a marzo 2012.
<http://www.flickr.com/>

Francisca Martinez, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://francisca-martinez.blogspot.mx/>

Grupo Cobos, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.grupocobos.com.mx/>

Hago, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://hago.com.mx/>

Hardwood flooring, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.hardwoodflooringbuyersguide.com/>

HIMSA, 2009. Fecha de consulta: diciembre 2011.
<http://www.himsa.com.mx/>

Homepages (catalog), s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://homepages.mty.itesm.mx/al794057/boceto.html>

Howard Models (architectural presentations, renderings and models), s/f. Fecha de consulta: febrero 2012.
<http://www.howardmodels.com/>

Innatia (artesanías y manualidades), 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://manualidades.innatia.com/>

Inver Models (modelmakers to architecture), s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.invermodels.co.uk/>

ITESCAM, 2012. Fecha de consulta: diciembre 2011.
<http://www.itescam.edu.mx/>

Itp, s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.itp.eu/>

Jomaro (fábrica integral de poliuretano), 2009. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.jomaro.com.ar/>

Jordan Akustik, s/f. Fecha de consulta: febrero 2012.
<http://www.jordanakustik.dk/>

Lapponia Opifex, s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.lapponiaopifex.fi/>

LinearX Systems Inc., 2005. Fecha de consulta: diciembre 2011.
<http://www.linearx.com/>

LIVELINE, s/f. Fecha de consulta: diciembre 2011.
<http://www.liveline.be/>

Manualidades Navideñas, 2010. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://manualidadesnavidenas.net/>

María Elicegui Villegas, 2010. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://p7mariaeliceguiucjc.blogspot.mx/>

María Lladró, 2010. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://marialladro3y4.blogspot.mx/>

Marzua, s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://marzua.blogspot.mx/>

Materialicious, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.materialicious.com/>

Moé Idolatry, 2011. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://moeidolatry.com/>

Müller – BBM GmbH, 2012. Fecha de consulta: febrero 2012.
<http://www.muellerbbm.com/>

Multifeutre du Québec Ltée, s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.
<http://www.multifeutre.com/>

Myurbanist (six trending urbanist themes for 2012), 2012. Fecha de consulta: febrero 2012.
<http://www.myurbanist.com/>

National Instruments, 2012. Fecha de consulta: diciembre 2011.
<http://www.ni.com/>

Odeon, s/f. Fecha de consulta: febrero 2012.
<http://www.odeon.dk/>

ONEOFF, 2010. Fecha de consulta: febrero y marzo 2012.
<http://www.oneoff.it/>

Owens Corning, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.owenscorning.com/>

Pc Office, s/f. Fecha de consulta: diciembre 2011.

<http://www.pc-offices.com/>

Pinta acoustic inc., s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.pinta-acoustic.com/>

Poliuretanos, s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.poliuretanos.com/>

Portal MundoHi – Fi (alta fidelidad), s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.mundohi-fi.com/>

Rockwool, s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.rockwool.es/>

Rolysig (materiales de construcción), 2010. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.rolysig.com/>

Russell + Mills Studios, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.russellmillsstudios.com/>

Sweet Onion Creations (architectural models and rendering), s/f. Fecha de consulta: junio 2011.

<http://www.sweetonioncreations.com/projects/>

The Official Website of the Beijing 2008 Olympic Games, 2008. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://en.beijing2008.cn/>

UK Consumer News from idealo, s/f. Fecha de consulta: diciembre 2011.

<http://news.idealco.co.uk/>

Valenbeck (packing and freight services Ltd), s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.valenbeck.co.uk/>

WAN Link Sniper, 2012. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://wanlinksniper.blogspot.mx/>

Wikipedia, 2012. Fecha de consulta: diciembre 2011 a marzo 2012.

<http://es.wikipedia.org/>

WSDG (acoustics and audio/video design firm), s/f. Fecha de consulta: febrero 2012.

<http://www.wsdg.com/>

ΠΡΟΠΛΑΣΜΑ - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ (Proplasma), s/f. Fecha de consulta: marzo 2012.

<http://www.architecturalmodel.gr/>

ANEXOS

ANEXO 1

Planos e imágenes digitales de los distintos elementos que conforman el tubo de impedancias

La figura A1.1, señala los elementos que componen al tubo de impedancias.

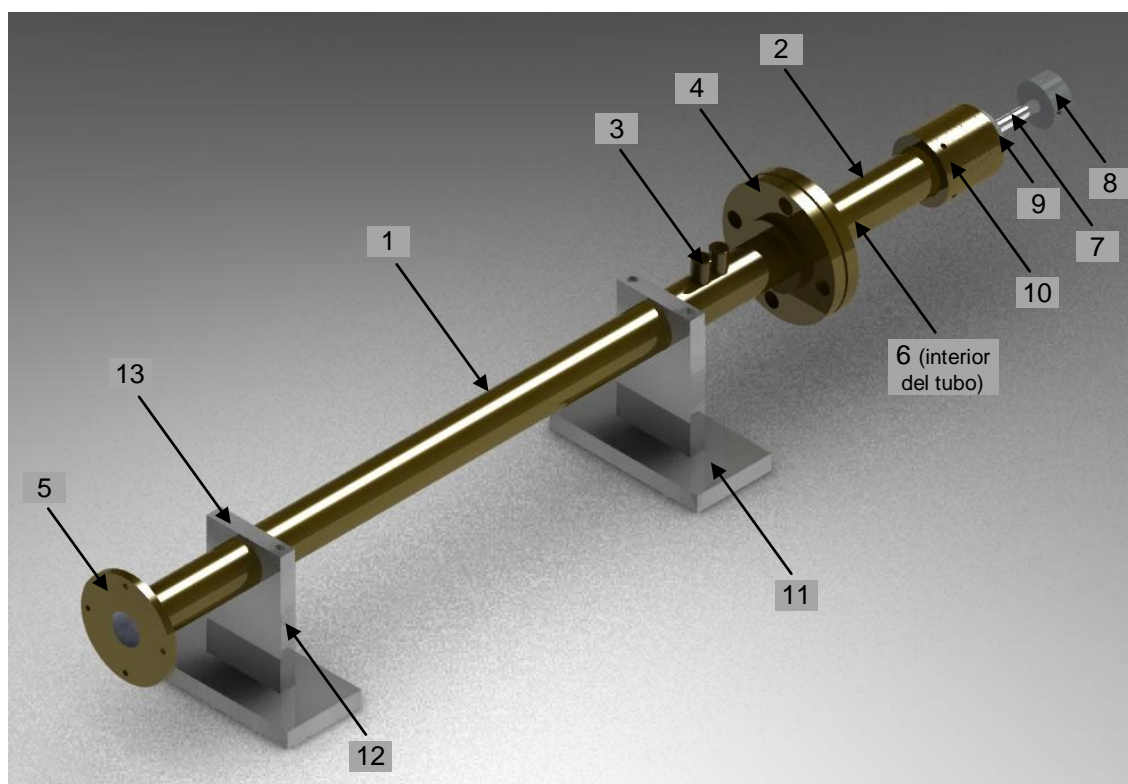


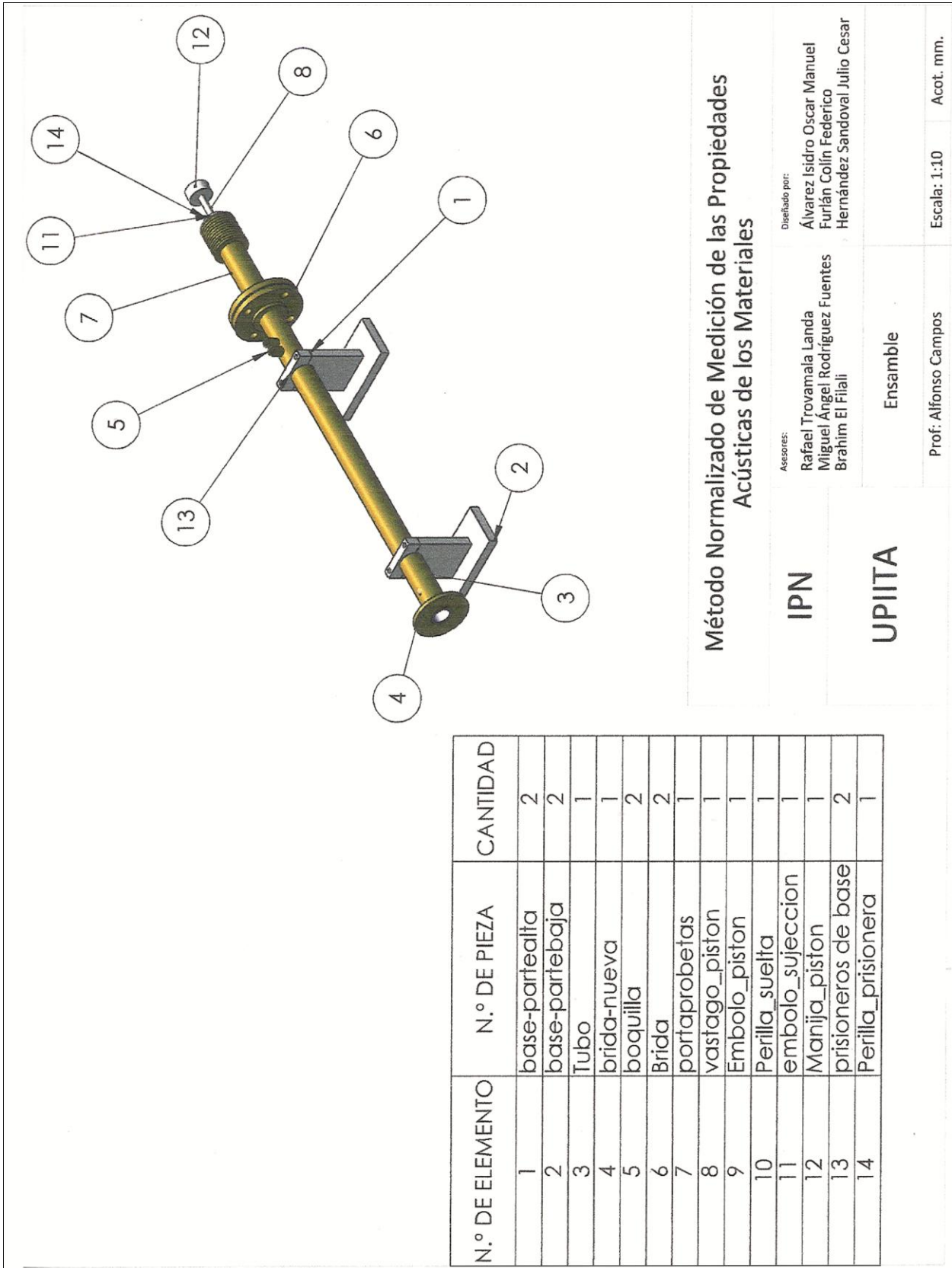
Fig. A1.1. Imagen digital del tubo de impedancias que muestra las partes que lo componen. (Imagen realizada por alumnos de UPIITA del IPN)

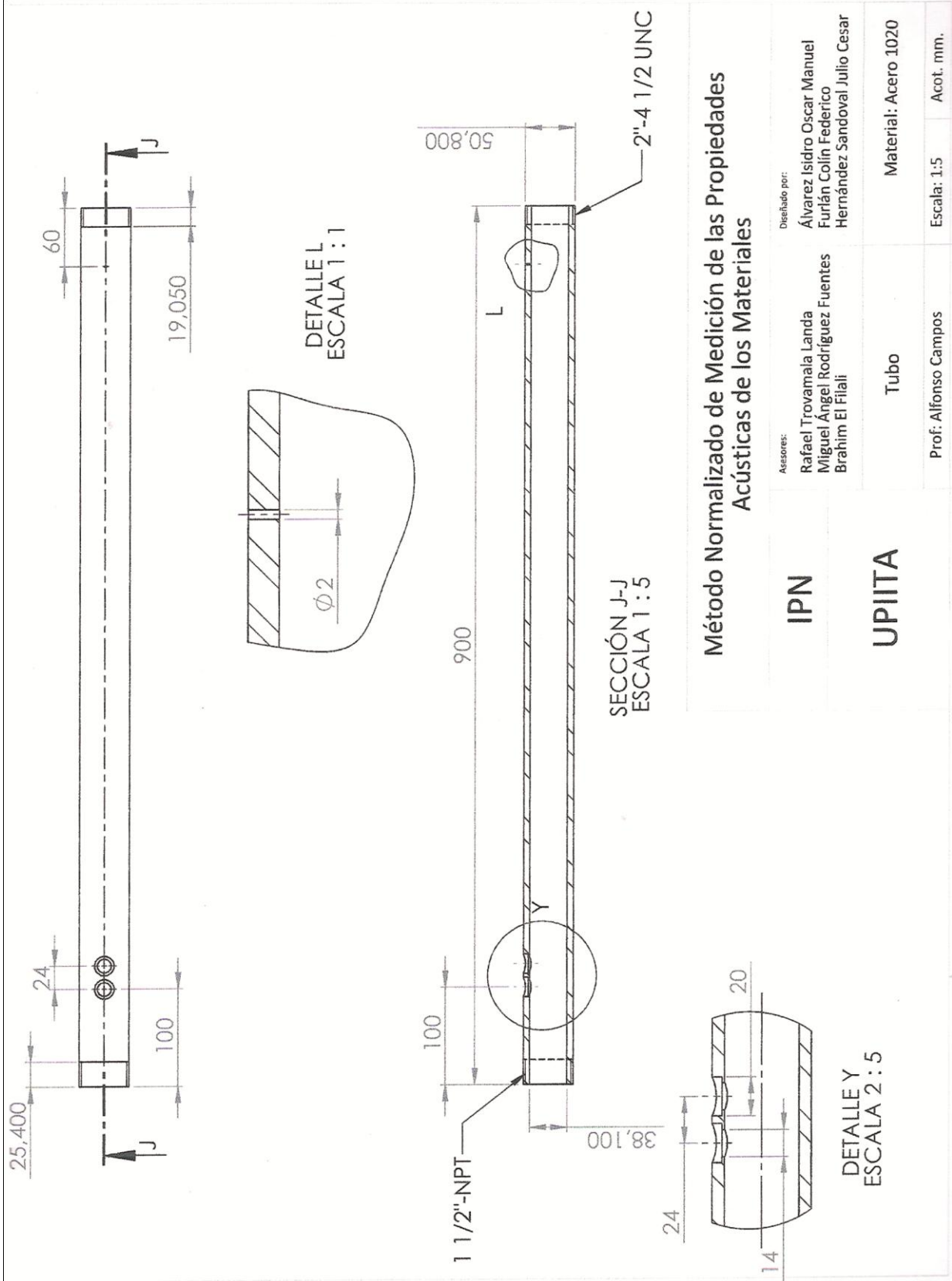
Las partes de que se compone el tubo de impedancias son las siguientes (fig. A1.2):

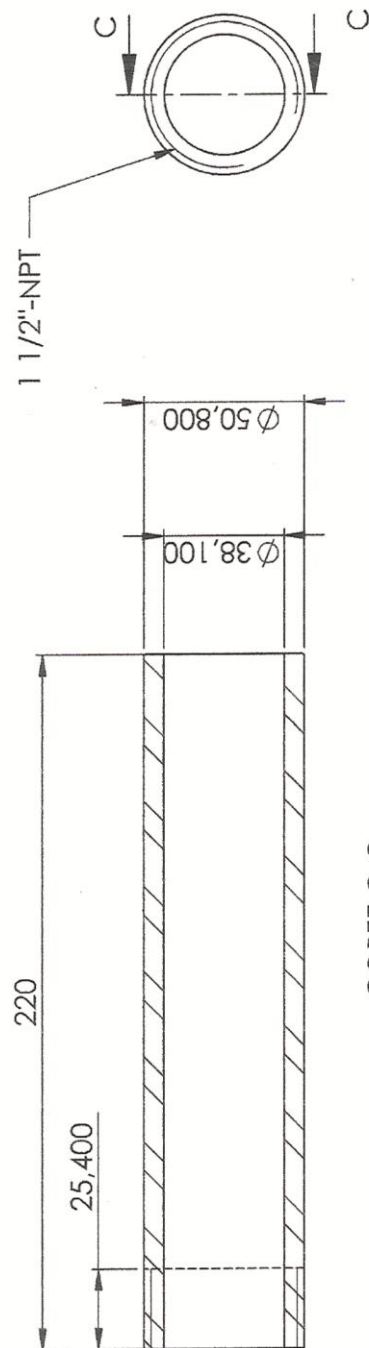


Fig. A1.2. Componentes del tubo de impedancias.

A continuación se muestran los planos de cada elemento:



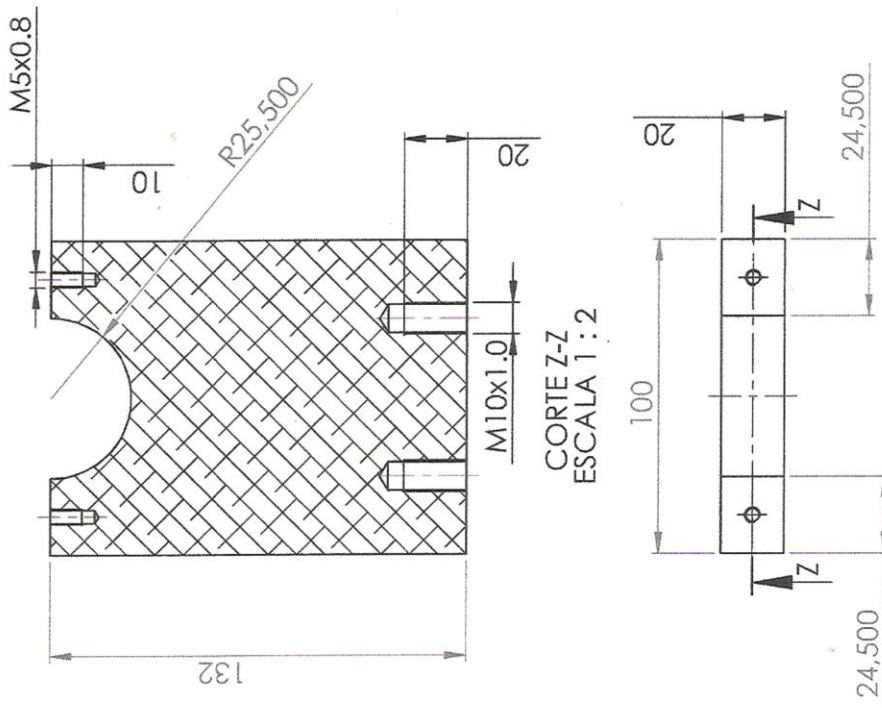




CORTE C-C
ESCALA 1:2

Método Normalizado de Medición de las Propiedades Acústicas de los Materiales

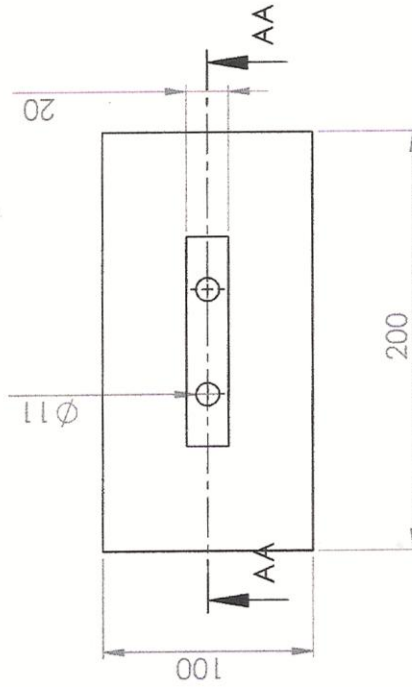
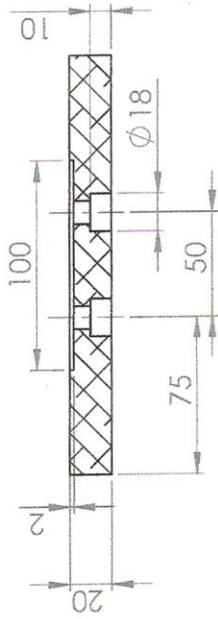
IPN	Asesores:	Diseñado por:
	Rafael Trovamala Landa Miguel Ángel Rodríguez Fuentes Brahim El Filali	Álvarez Isidro Oscar Manuel Furlán Colín Federico Hernández Sandoval Julio Cesar
UPIITA	Portaprobetas	Material: Acero 1020
	Prof: Alfonso Campos	Escala: 1:2 Acot. mm.



Método Normalizado de Medición de las Propiedades Acústicas de los Materiales

IPN	Asesores: Rafael Trovamála Landa Miguel Ángel Rodríguez Fuentes Brahim El Filali	Diseñado por: Álvarez Isidro Oscar Manuel Furián Colín Federico Hernández Sandoval Julio Cesar
UPIITA	Base Parte Alta Prof. Alfonso Campos	Material: Acero 1060 Escala: 1:2 Acot. mm.

CORTE AA-AA
ESCALA 1:3



Método Normalizado de Medición de las Propiedades Acústicas de los Materiales

IPN

UPIITA

Asesores:

Rafael Trovamála Landa
Miguel Ángel Rodríguez Fuentes
Brahim El Filali

Diseñado por:

Álvarez Isidro Oscar Manuel
Furlán Colín Federico
Hernández Sandoval Julio Cesar

Base Parte Baja

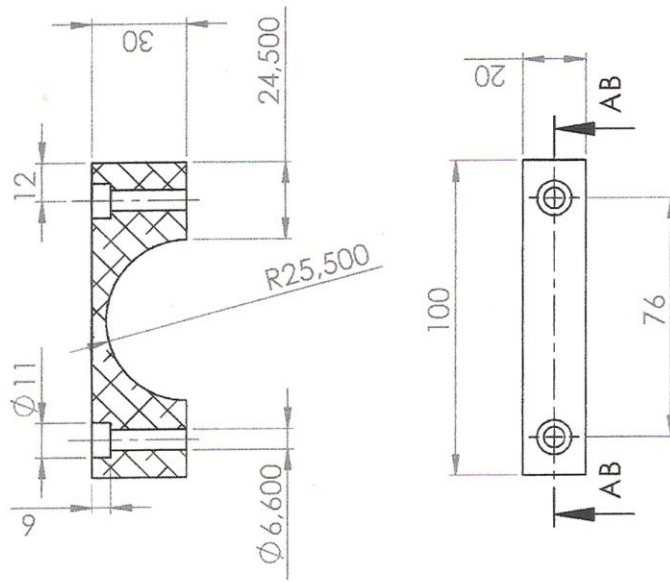
Material: Acero 1060

Prof: Alfonso Campos

Escala: 1:3

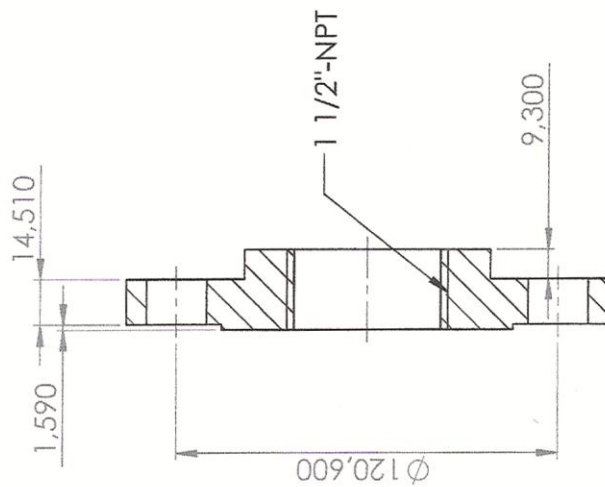
Acot. mm.

CORTE AB-AB
ESCALA 1:2

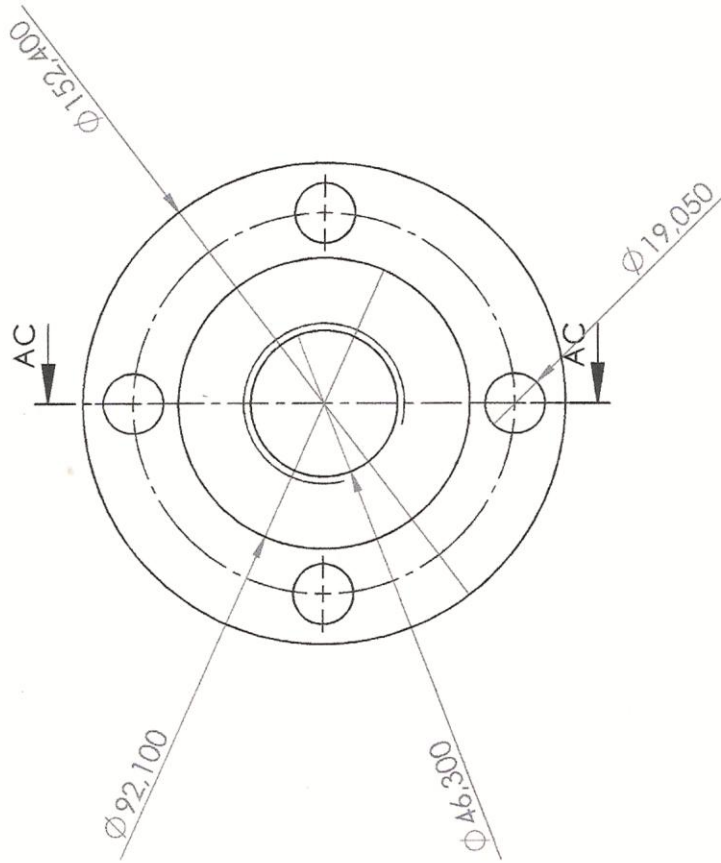


Método Normalizado de Medición de las Propiedades Acústicas de los Materiales

IPN	Asesores: Rafael Trovamála Landa Miguel Ángel Rodríguez Fuentes Brahim El Filali	Diseñado por: Álvarez Isidro Oscar Manuel Furlán Colín Federico Hernández Sandoval Julio Cesar
UPIITA	Prisioneros de Base Prof: Alfonso Campos	Material: Acero 1060 Escala: 1:2 Acot. mm.



CORTE AC-AC
ESCALA 1:2



Método Normalizado de Medición de las Propiedades Acústicas de los Materiales

IPN

Asesores:

Rafael Trovamála Landa
Miguel Ángel Rodríguez Fuentes
Brahim El Filali

Diseñado por:

Álvarez Isidro Oscar Manuel
Furlán Colín Federico
Hernández Sandoval Julio Cesar

UPIITA

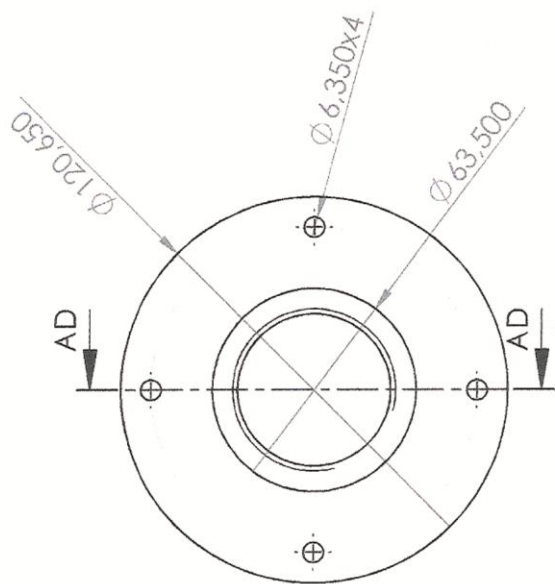
Brida

Material: Acero 1060

Prof: Alfonso Campos

Escala: 1:2

Acot: mm.



CORTE AD-AD
ESCALA 1 : 2

Método Normalizado de Medición de las Propiedades Acústicas de los Materiales

IPN

Asesores:
Rafael Trovamála Landa
Miguel Ángel Rodríguez Fuentes
Brahim El Filali

Diseñado por:
Álvarez Isidro Oscar Manuel
Furlán Colín Federico
Hernández Sandoval Julio Cesar

UPIITA

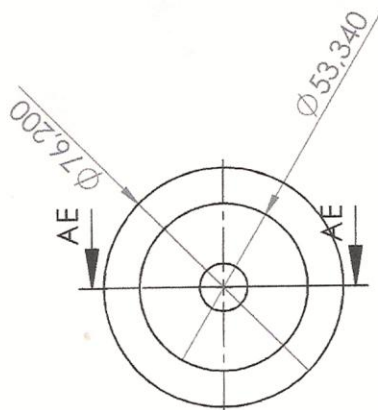
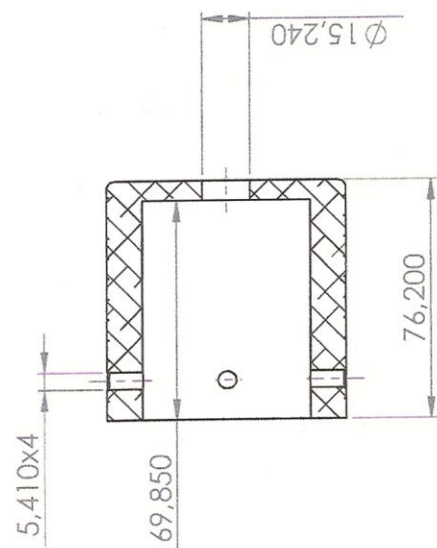
Brida Nueva

Material: Acero 1020

Prof: Alfonso Campos

Escala: 1:2

Acot: mm.



Método Normalizado de Medición de las Propiedades Acústicas de los Materiales

IPN

Asesores:

Rafael Trovamála Landa
Miguel Ángel Rodríguez Fuentes
Brahim El Filali

Diseñado por:

Álvarez Isidro Oscar Manuel
Furlán Colín Federico
Hernández Sandoval Julio Cesar

UPIITA

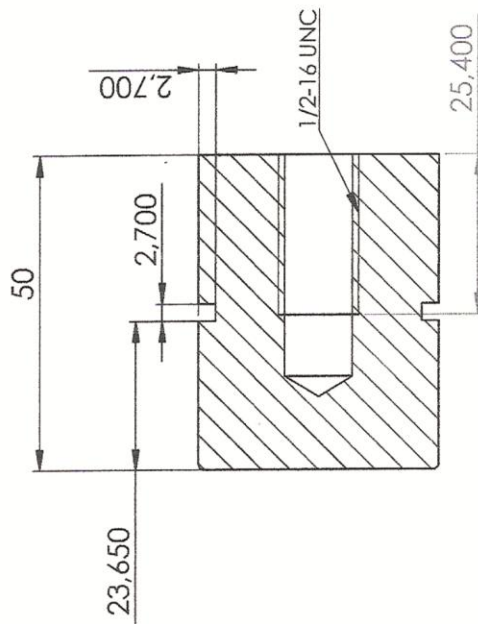
Embolo Sujecion

Material: Aluminio

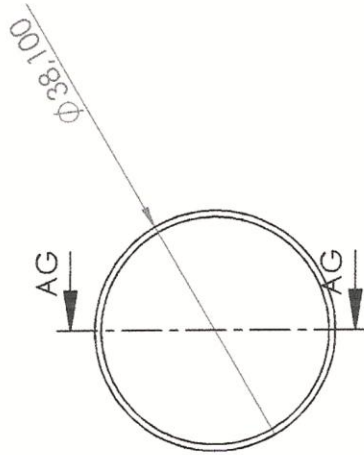
Prof: Alfonso Campos

Escala: 1:2

Acot. mm.



CORTE AG-AG
ESCALA 1 : 1



Método Normalizado de Medición de las Propiedades Acústicas de los Materiales

IPN

UPIITA

Asesores:

Rafael Trovamála Landa
Miguel Ángel Rodríguez Fuentes
Brahim El Filali

Diseñado por:

Álvarez Isidro Oscar Manuel
Furlán Colín Federico
Hernández Sandoval Julio Cesar

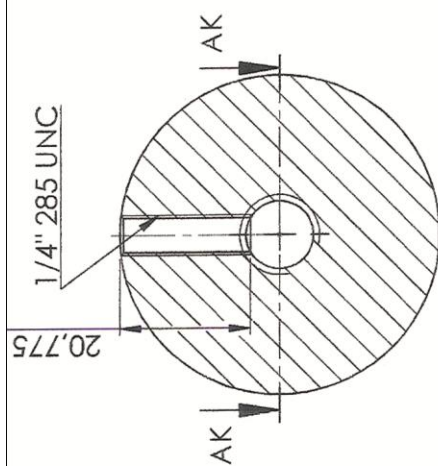
Embolo Piston

Material: Aluminio

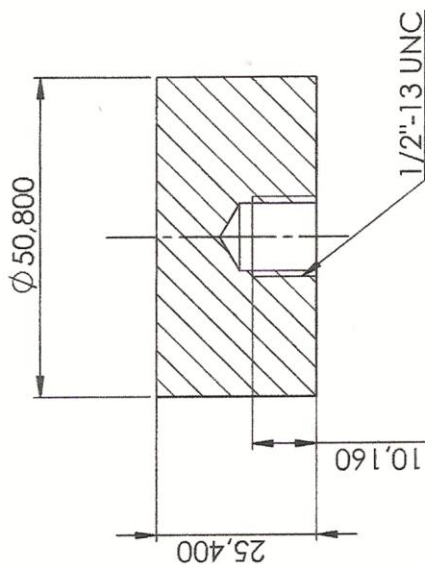
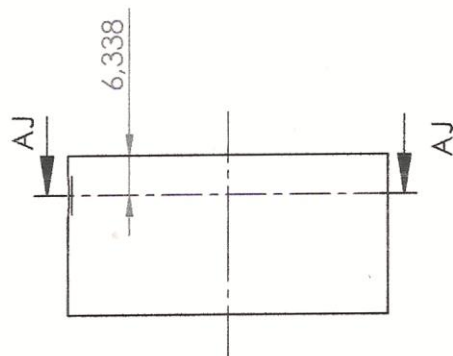
Prof: Alfonso Campos

Escala: 1:1

Acot. mm.



CORTE AJ-AJ
ESCALA 1 : 1



CORTE AK-AK
ESCALA 1 : 1

Método Normalizado de Medición de las Propiedades Acústicas de los Materiales

IPN

Asesores:

Rafael Trovamála Landa
Miguel Ángel Rodríguez Fuentes
Brahim El Filali

Diseñado por:

Álvarez Isidro Oscar Manuel
Furlán Colín Federico
Hernández Sandoval Julio Cesar

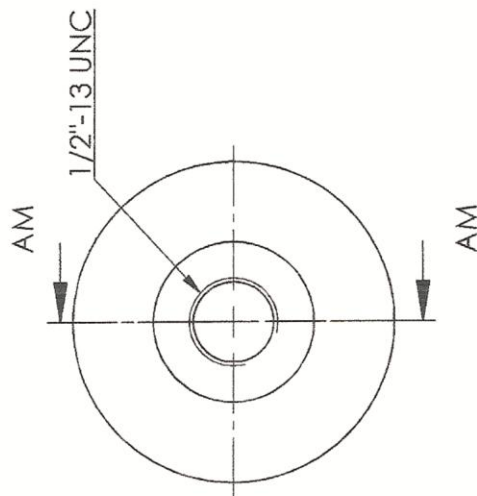
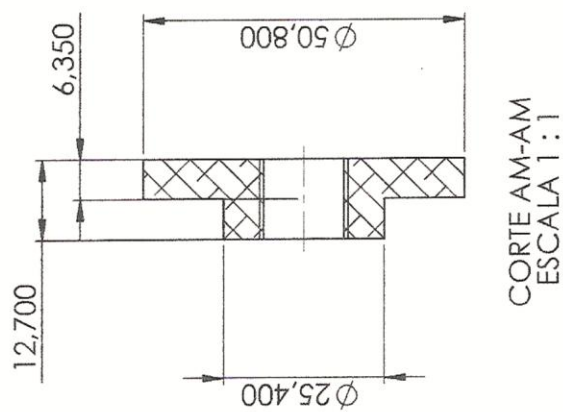
UPIITA

Manija Piston

Material: Aluminio

Prof: Alfonso Campos

Escala: 1:1 Acot. mm.



Método Normalizado de Medición de las Propiedades Acústicas de los Materiales

IPN

Asesores:
Rafael Trovamála Landa
Miguel Ángel Rodríguez Fuentes
Brahim El Filali

Diseñado por:
Álvarez Isidro Oscar Manuel
Furlán Colín Federico
Hernández Sandoval Julio Cesar

UPIITA

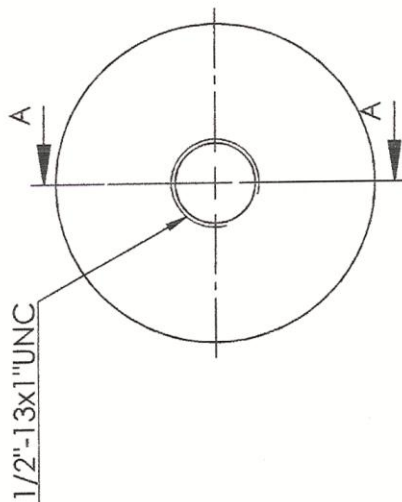
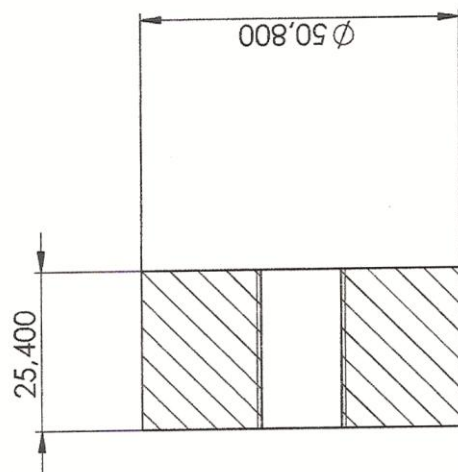
Perilla Prisionera

Material: Aluminio

Prof. Alfonso Campos

Escala: 1:1

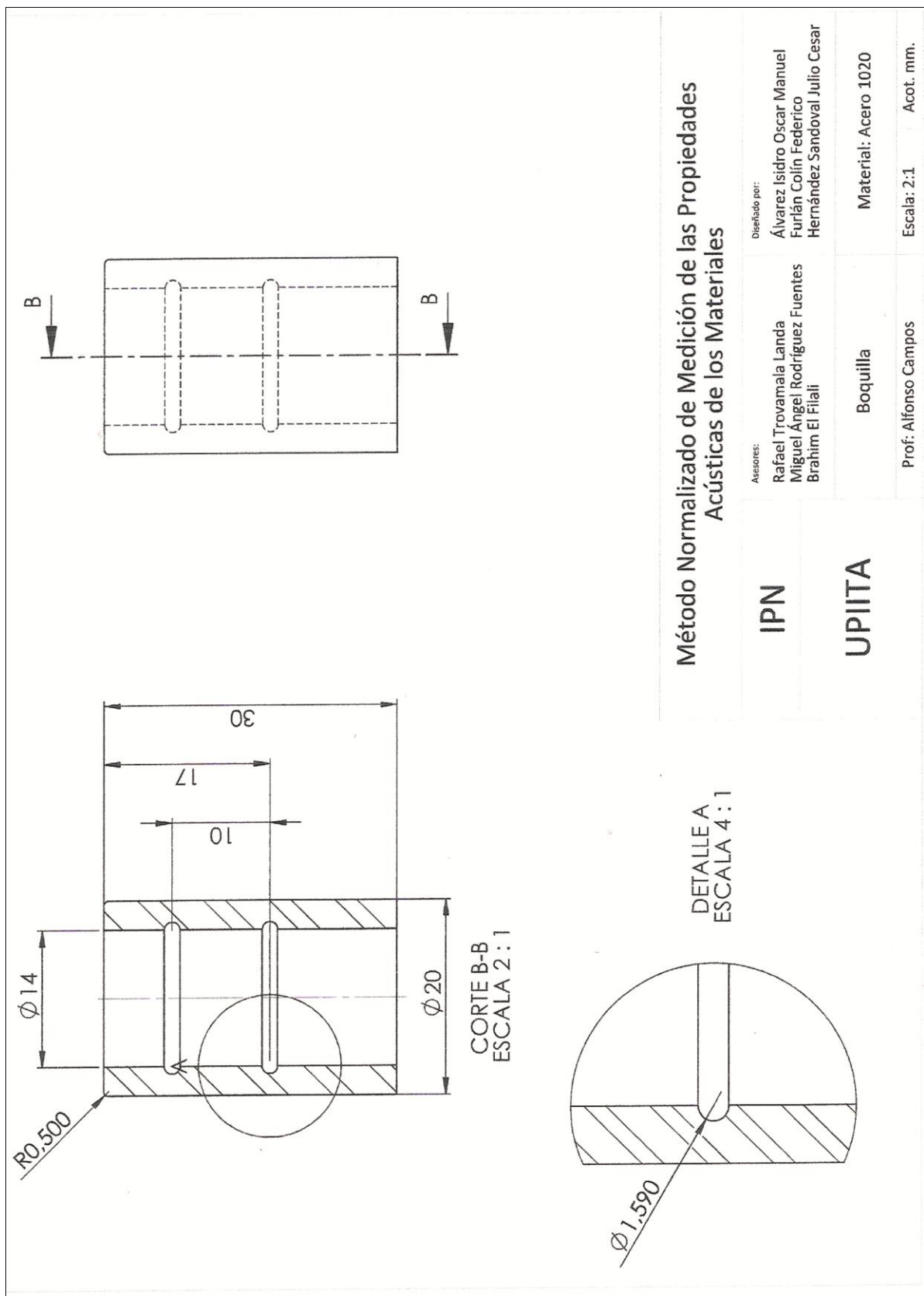
Acot. mm.



CORTE A-A
ESCALA 1:1

Método Normalizado de Medición de las Propiedades Acústicas de los Materiales

IPN	Diseñado por:	
	Rafael Trovamaia Landa Miguel Ángel Rodríguez Fuentes Brahim El Filali	
UPIITA	Diseñado por:	
	Álvarez Isidro Oscar Manuel Furlán Colín Federico Hernández Sandoval Julio Cesar	
Perilla Suelta		Material: Aluminio
Prof: Alfonso Campos		Escala: 1:1 Acot. mm.



ANEXO 2

Proceso de manufactura del tubo de impedancias

1. Primero se realizó el corte exacto de la longitud del tubo y porta muestras, como se muestra en la figura A2.1.



Fig. A2.1. Corte del tubo y porta muestras.

2. Se continuó con la elaboración de cuerdas en uno de los extremos de cada tubo, para su unión con bridas (fig. A2.2). Las cuerdas se realizaron con un buril y son de tipo NTP, lo que significa que son cuerdas cónicas.



Fig. A2.2. Elaboración de cuerdas en tubos y unión con bridas.

3. Subsecuentemente se procedió a la realización de los orificios para colocar las boquillas (porta micrófonos) donde se sujetarán los micrófonos y el orificio de desfogue. Para su manufactura se utilizó una fresadora con una broca de 3/4" (fig. A2.3).

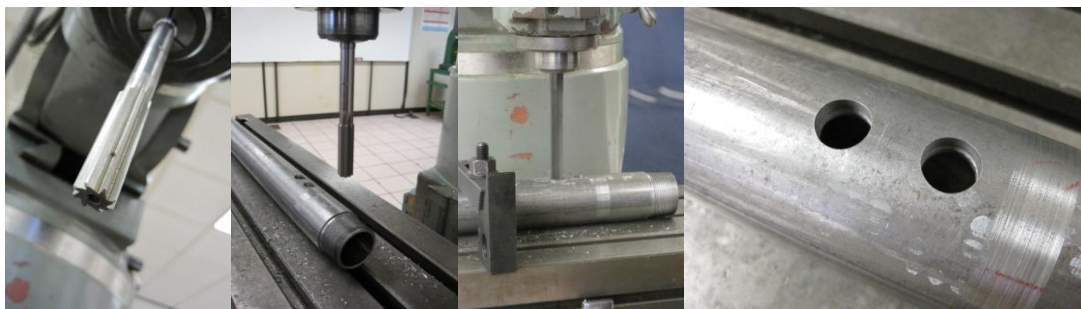


Fig. A2.3. Realización de los orificios en el tubo.

4. Posteriormente se fabricaron los porta micrófonos y se soldaron al tubo como se observa en la figura A2.4.



Fig. A2.4. Porta micrófonos.

5. Se continuó con la manufactura del pistón que contendrá la muestra de material.

Primero se obtuvo la base del pistón, la cual se cortó al tamaño exacto y se le realizó un orificio para recibir el vástago con una broca de 5/16". Al orificio se le maquinó una cuerda de 16 hilos por pulgada con un machuelo de 3/8". Para asegurar el sellado al contacto con el tubo en su interior, a la base se le realizó una hendidura donde se colocó un empaque de silicón (fig. A2.5).

En seguida se elaboró el vástago a partir de una barra circular de aluminio. Se realizaron 16 cuerdas por pulgada a todo lo largo de la barra (fig. A2.6).

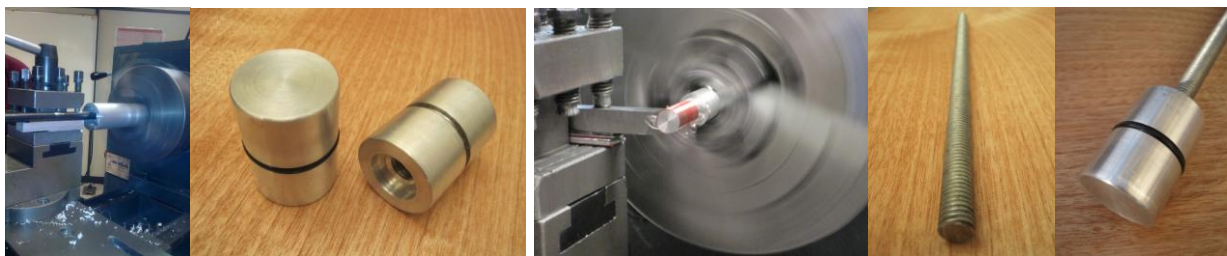


Fig. A2.5 y A2.6. Manufactura del pistón y vástago.

6. Después se maquinaron la manija y la perilla prisionera con el mismo procedimiento con que se fabricó el pistón. Se cortaron al tamaño exacto y se realizaron cuerdas al interior de su centro (fig. A2.7).



Fig. A2.7. Manija y perilla prisionera.

7. Por último se elaboraron las bases donde se sostendrá el tubo (fig. A2.8), las cuales se fabricaron con acero 1060. Se realizaron cortes sencillos y cuerdas como se ha descrito anteriormente.



Fig. A2.8. Elementos que componen la base donde se sostendrá el tubo.

8. Las bridas para la unión del tubo y porta muestras, así como la brida para el acoplamiento de la fuente sonora se adquirieron.
9. Finalmente cada uno de los elementos se sometió a un proceso de sellado y pintado, como se observa en la figura A2.9.



Fig. A2.9. Sellado y pintado de los elementos.

Por otra parte, se elaboraron las “camisas” de plastisol para los micrófonos. Primero se adquirió un tubo de metal que tuviera el mismo diámetro que el micrófono. El tubo fue sumergido en una solución de plastisol, pero previamente fue calentado a fuego medio para garantizar la adhesión del plastisol al tubo. Posteriormente, el tubo recubierto de plastisol se introdujo a un horno de estufa convencional a 140°C durante 15 minutos aproximadamente. Durante este lapso de tiempo, el plastisol adquirió la consistencia necesaria para su uso (fig. A2.10).



Fig. A2.10. Elaboración de “camisas” de plastisol para los micrófonos.

Proceso de cromado duro

Primero debe diseñarse un ánodo de plomo (fig. A2.11) con antimonio¹ al 6%, que corresponda a la forma del metal a cromar (en este caso sólo se deseaba cromar la parte interna del tubo, por lo que se diseñó una especie de varilla que pudiera colocarse al centro del tubo). El ánodo actuará como el elemento positivo y conductor del proceso, debido al plomo.



Fig. A2.11. Diseño del ánodo.

¹ Es necesario agregar antimonio, para dar rigidez al plomo, ya que éste es muy blando por naturaleza.

Tanto el ánodo como el tubo (el tubo actuará como el elemento negativo del proceso), deben sujetarse a un rack a través de una solera de aluminio² (fig. A2.12). El rack debe contener en sus extremos pedazos de fibra de vidrio para evitar que se haga una sola corriente y se divida en negativo y positivo. El ánodo debe colocarse a 3/8" de distancia de la pared interna del tubo perfectamente centrado (fig. A2.13).



Fig. A2.12. Solera de aluminio.

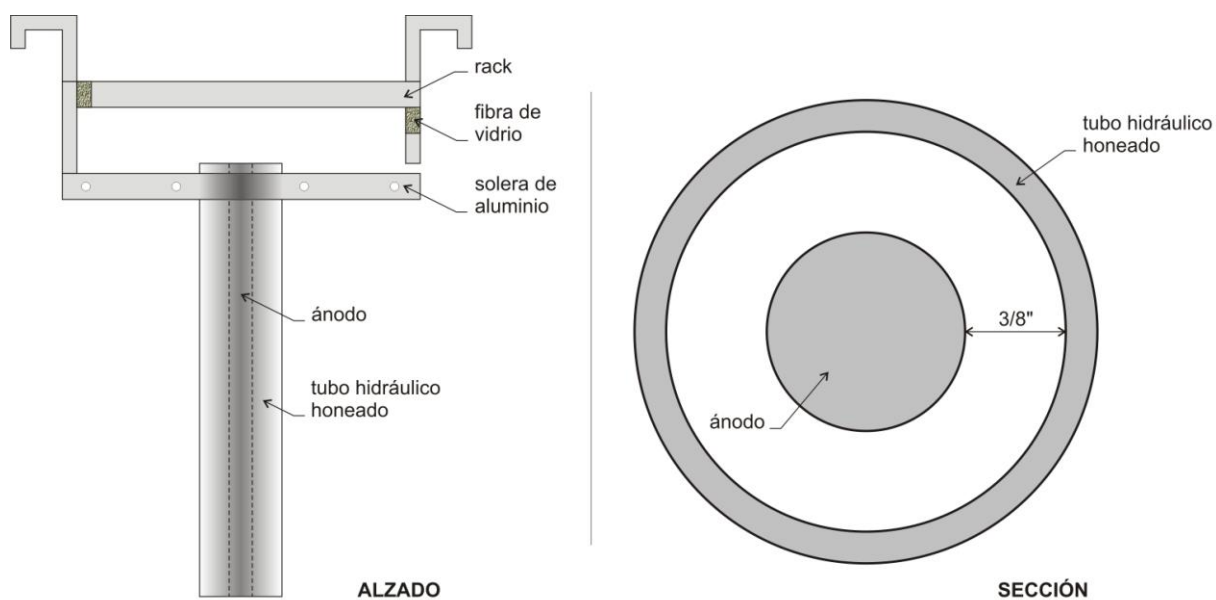


Fig. A2.13. Colocación del ánodo y tubo.

² El aluminio es un buen conductor de corriente.

Después de sujetar el ánodo y el tubo al rack, éstos deben ser sumergidos a una solución de trióxido de cromo a 250 gramos por litro de agua y ácido sulfúrico³ (fig. A2.14).



Fig. A2.14. Tina con la solución de trióxido de cromo y ácido sulfúrico.

Por último, la solución se somete a una corriente de 3.5 volts durante 2 ½ horas para la aplicación de 2 milésimas de cromo (por hora se croma 1 milésima aproximadamente). Durante ese tiempo, el elemento positivo atrae al negativo y viceversa, por lo que el ánodo (elemento positivo y conductor) le inyecta partículas de cromo a la superficie de metal (elemento negativo) contenidas en el trióxido de cromo.

Como resultado, se obtiene una fina capa de cromo, con una superficie lisa, dura y resistente a la abrasión, corrosión y fricción (fig. A2.15).



Fig. A2.15. Capa de cromo.

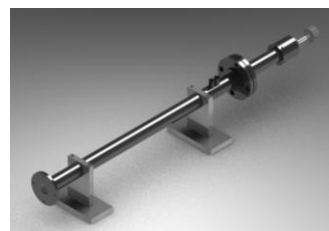
³ El ácido sulfúrico es un estabilizador de la solución, que provee de brillantez y dureza al cromo.

ANEXO 3

Tutorial para la medición de coeficientes de absorción por el método de tubo de impedancias

Equipo e instrumentación necesaria para realizar la medición:

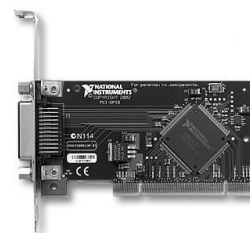
- Tubo de impedancias



- Computadora de escritorio o portátil



- Tarjeta PCI-GPIB+NI-488.2 para computadora de escritorio



- Tarjeta GPIB-USB-HS para computadora portátil



- Cable GPIB



- Generador de funciones



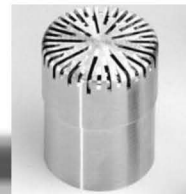
- Amplificador de potencia



- *Driver* o fuente sonora



- Micrófonos de presión de 1/2"



- Preamplificador para micrófono



- Analizador en tiempo real



Procedimiento para conectar y configurar correctamente el equipo e instrumentos antes de iniciar una medición:

1. Colocar la muestra de material en el porta muestras (fig. A3.1) y ensamblarlo con la otra parte del tubo (fig. A3.2).



Fig. A3.1. Colocación de muestra en el porta muestras



Fig. A3.2. Ensamble de porta muestras con el tubo.

2. Acoplar los micrófonos con su preamplificador como se observa en la figura A3.3 y conectar los cables para preamplificador a los preamplificadores de cada micrófono (fig. A3.4).



Fig. A3.3. Acoplamiento de micrófono con preamplificador. (<http://www.gras.dk/>)

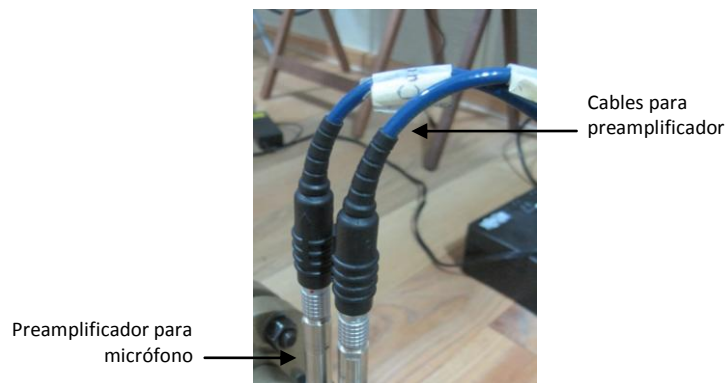


Fig. A3.4. Conexión de cables a preamplificadores.

- Posteriormente, conectar el otro extremo de los cables para preamplificador al analizador en tiempo real NOR 840 a un costado del mismo, a *Channel 1* y *Channel 2* para el micrófono 1 y 2 respectivamente (fig. A3.5).



Fig. A3.5. Conexión de micrófonos a analizador.

- Asegurarse que las opciones de *Heating* y *Pol. Volt*, estén en 0 y 200 respectivamente (fig. A3.6 y A3.7).

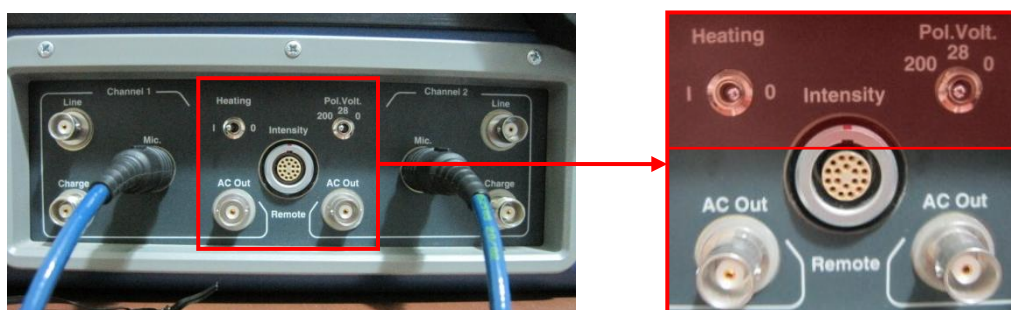


Fig. A3.6 y A3.7. Configuración de *Heating* y *Pol. Volt*.

5. A continuación, colocar los micrófonos en los porta micrófonos del tubo de impedancias como se muestra en la figura A3.8. El micrófono 1 debe ubicarse en el porta micrófonos más cercano al *driver* o fuente sonora, y el micrófono 2 a la muestra de material.

Al momento de colocar los micrófonos, el diafragma de éstos debe queda a ras de la superficie interna del tubo (fig. A3.9).



Fig. A3.8. Colocación de micrófonos.



Fig. A3.9. Diafragma de los micrófonos a ras de la superficie interna del tubo.

6. Después, conectar el amplificador de potencia al *driver*, por medio de un cable para bocinas. Primero conectar un extremo de los cables al *driver* como se observa en la figura A3.10 y el otro extremo al amplificador (en su parte trasera) exactamente como se observa en la figura A3.11 (en ambos casos respetar la correlación de colores).



Fig. A3.10. Conexión de cables de bocina a *driver*.



Fig. A3.11. Conexión de cables de bocina a amplificador.

7. Colocar el *driver* en el extremo del tubo que posee el acoplamiento para la fuente sonora (fig. A3.12).



Fig. A3.12. Colocación de *driver* en tubo de impedancias.

8. Para controlar la atenuación del amplificador al *driver*, situar la perilla que se ubica en la parte frontal del equipo, en un valor de -10 (fig. A3.13 y A3.14). En este caso sólo se modifica la perilla de arriba, correspondiente a los cables conectados anteriormente.

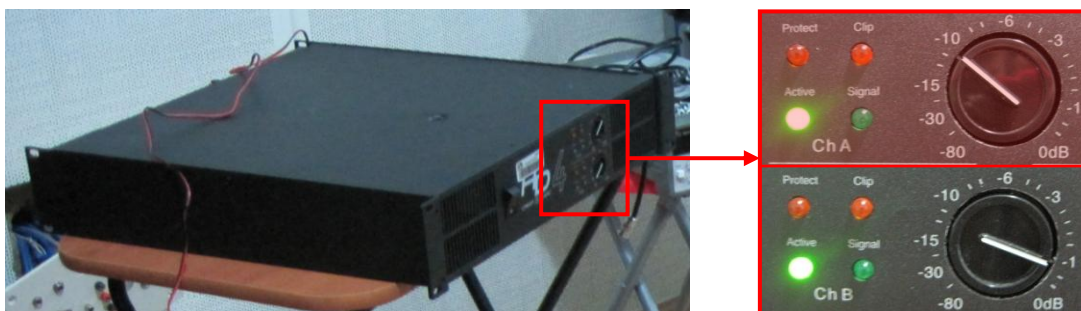


Fig. A3.13 y A3.14. Atenuación del amplificador.

9. Enseguida, conectar el amplificador al generador de funciones por medio de un cable para preamplificador como se observa de las figuras A3.15 a A3.18.



Fig. A3.15 y A3.16. Conexión al amplificador.



Fig. A3.17 y A3.18. Conexión al generador de funciones.

10. Si se utiliza una computadora de escritorio, se le debe instalar una tarjeta PCI-GPIB+NI-488.2 y después conectar la computadora al analizador en tiempo real por medio de un cable GPIB como se muestra en la figura A3.19. Por otra parte, si se utiliza una laptop, ésta debe conectarse vía USB al analizador por medio de una tarjeta GPIB-USB-HS como se observa en las figuras A3.20 y A3.21.

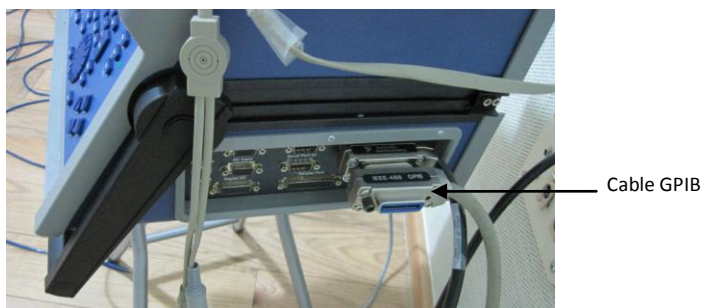


Fig. A3.19. Conexión de computadora de escritorio al analizador por medio de un cable GPIB.



Fig. A3.20 y A3.21. Conexión de una laptop al analizador por medio de una tarjeta GPIB-USB-HS vía USB.

11. Por último, colocar una purga en el orificio de desfogue ubicado cerca del *driver* para evitar fugas (fig. A3.22).



Fig. A3.22. Colocación de purga en el orificio de desfogue.

Procedimiento para calibrar los micrófonos:

1. Ahora bien, una vez conectados todos los elementos, se deben encender en el siguiente orden los equipos:

- Computadora
 - Generador de funciones
 - Amplificador de potencia
 - Analizador en tiempo real
2. Antes de realizar cualquier serie de mediciones consecutivas, se deben calibrar los micrófonos, para ello es necesario utilizar un calibrador de micrófonos y el analizador en tiempo real.

Primero presionar la tecla *Input* del teclado del analizador para conocer el estado de los micrófonos (fig. A3.23)



Fig. A3.23. Selección de la tecla *Input*.

3. Seguidamente aparecerá una ventana en la pantalla del analizador como se muestra en la figura A3.24. Esta pantalla señala el estado de los micrófonos, por lo que si algún micrófono se encuentra desactivado, se debe activar en esta ventana.



Fig. A3.24. Ventana *Input selection*.

4. Después presionar las teclas *Gain 1* y *Gain 2* (una a la vez) del teclado del analizador (fig. A3.25).



Fig. A3.25. Selección de las teclas *Gain 1* y *Gain 2*.

5. Posteriormente aparecerá una ventana como la de la figura A3.26. Dicha ventana señala el máximo de ganancias en decibeles que alcanzará cada micrófono, en este caso se muestra el ejemplo con el *Channel 2* (micrófono 2).

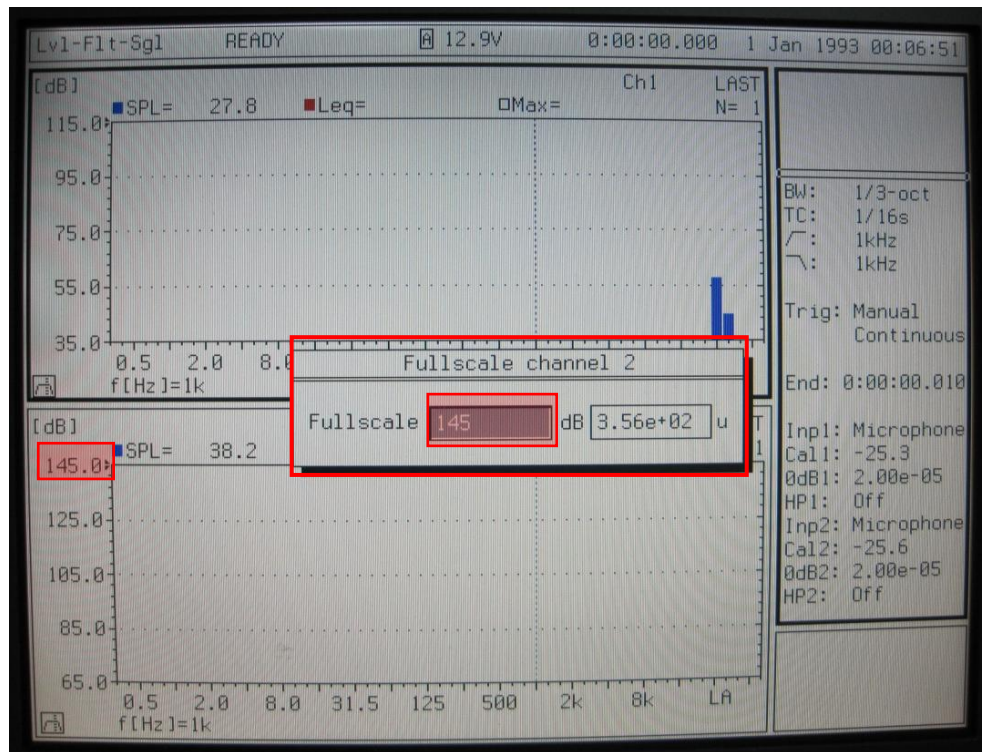


Fig. A3.26. Ventana de ganancias en decibeles para los micrófonos.

6. Ajustar la ganancia de cada micrófono a 115, la cual se verá reflejada en la escala de la gráfica (fig. A3.27 y A3.28).

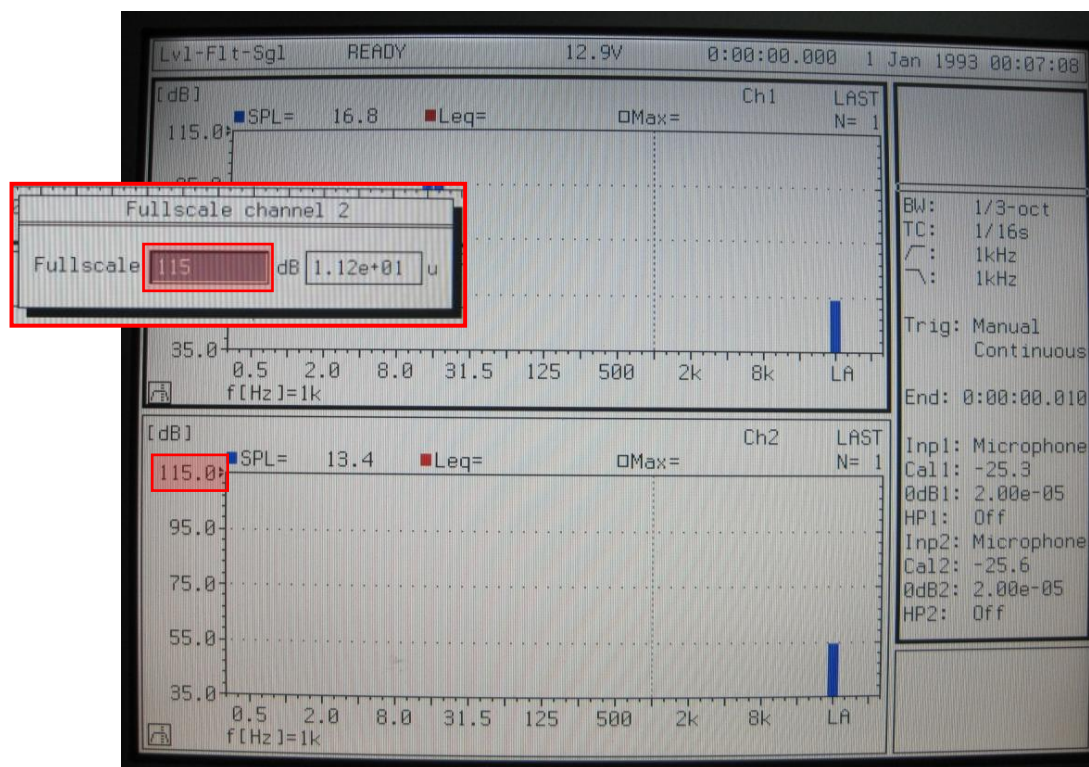


Fig. A3.27 y A3.28. Ajuste de ganancias.

7. Una vez ajustadas las ganancias de los micrófonos, introducir cada micrófono (uno a la vez) en el calibrador como se muestra en la figura A3.29. Cuando el micrófono se encuentre dentro, encender el calibrador.



Fig. A3.29. Introducción del micrófono al calibrador.

8. Inmediatamente seleccionar la tecla *Cal* del teclado del analizador para realizar la calibración (fig. A3.30).



Fig. A3.30. Selección de la tecla *Cal*.

9. Enseguida aparecerá una ventana en la pantalla del analizador como se muestra en la figura A3.31. Esta ventana señala los valores de sensibilidad que actualmente tiene el micrófono. Ajustar los valores de *Sens* de cada micrófono, de tal forma que *Level* llegue a 114.

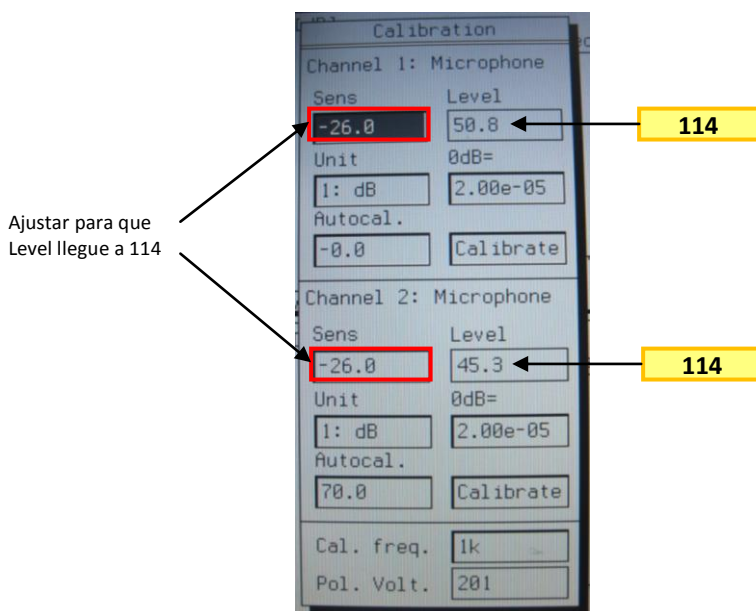


Fig. A3.31. Ajuste de valores de la ventana de *Calibration*.

Procedimiento para realizar una medición:

1. Antes de activar el software desde la computadora, configurar el analizador NOR 840. Primero presionar la tecla I/O del teclado del analizador (fig. A3.32).

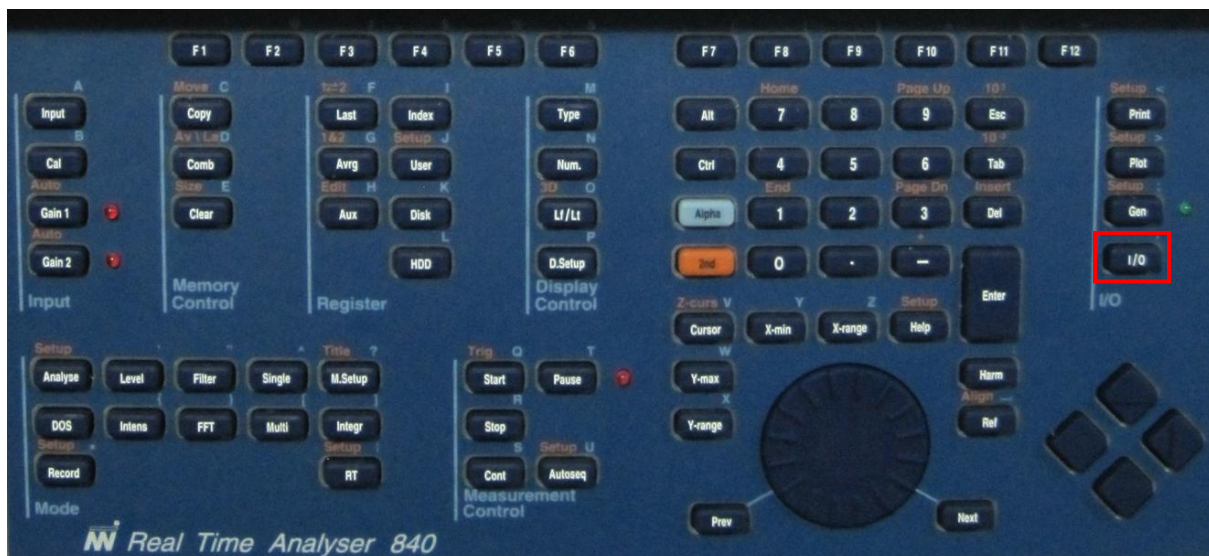


Fig. A3.32. Selección de la tecla I/O.

2. Inmediatamente aparecerá una ventana en la pantalla del analizador como se muestra en la figura A3.33. En la opción de *IEEE REMOTE*, cambiar a *STANDBY*, mientras que en *IEEE ADDRESS*, cambiar el valor a 7.

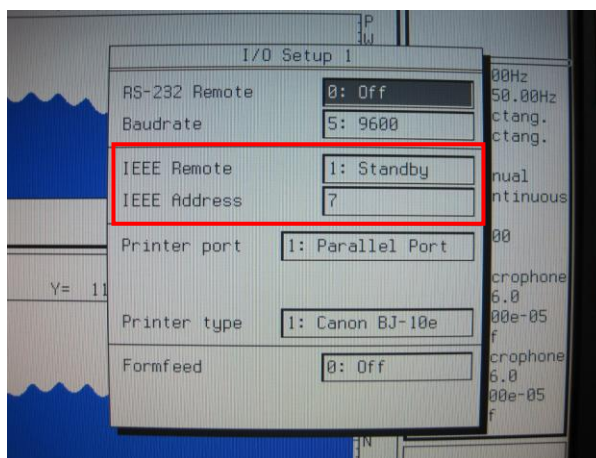


Fig. A3.33. Ventana I/O Setup 1.

- Después de configurar el analizador, puede activarse el software desde la computadora. Seleccionar la opción de Nueva medición del menú de Medir (fig. A3.34).



Fig. A3.34. Selección de la opción Nueva medición.

- Enseguida aparecerá una ventana como la que se muestra en la figura A3.35. Introducir los datos requeridos e iniciar la medición.

Fig. A3.35. Ventana para realizar una nueva medición.

Procedimiento para calibrar el tubo de impedancias:

1. Según La Norma ASTM E1050 – 98, el proceso de calibración proporciona un medio de corrección de la transferencia de datos medidos por los dos canales o micrófonos. Recomienda calibrar el tubo antes de cada periodo de mediciones consecutivas.

Se sugiere colocar una muestra altamente absorbente para prevenir fuertes reflexiones, sin embargo la mayoría de los materiales presentan una baja absorción en las frecuencias bajas, lo que afecta la precisión de los resultados.

Un ejemplo de material altamente absorbente, es el *Black Acoustic Board* de *Owens Corning*, el cual se compone de fibra de vidrio (fig. A3.36).



Fig. A3.36. Muestra de fibra de vidrio (*Black Acoustic Board*) de *Owens Corning*.

2. Una vez colocada la muestra de material en el tubo. Seleccionar la opción de Calibración del menú Medir (fig. A3.37).



Fig. A3.37. Selección de la opción Calibración.

3. Enseguida aparecerá una ventana como la que se muestra en la figura A3.38. Seguir los pasos solicitados por el software: primero se debe seleccionar la opción de Realizar Calibración, luego pedirá que retire la purga para poder cambiar los micrófonos de posición, seleccionar Realizar Calibración nuevamente, retirar la purga y cambiar los

micrófonos a su posición original. Se recomienda cambiar los micrófonos un minuto después de haber retirado la purga y apagar el amplificador de potencia cuando se realice dicho cambio.

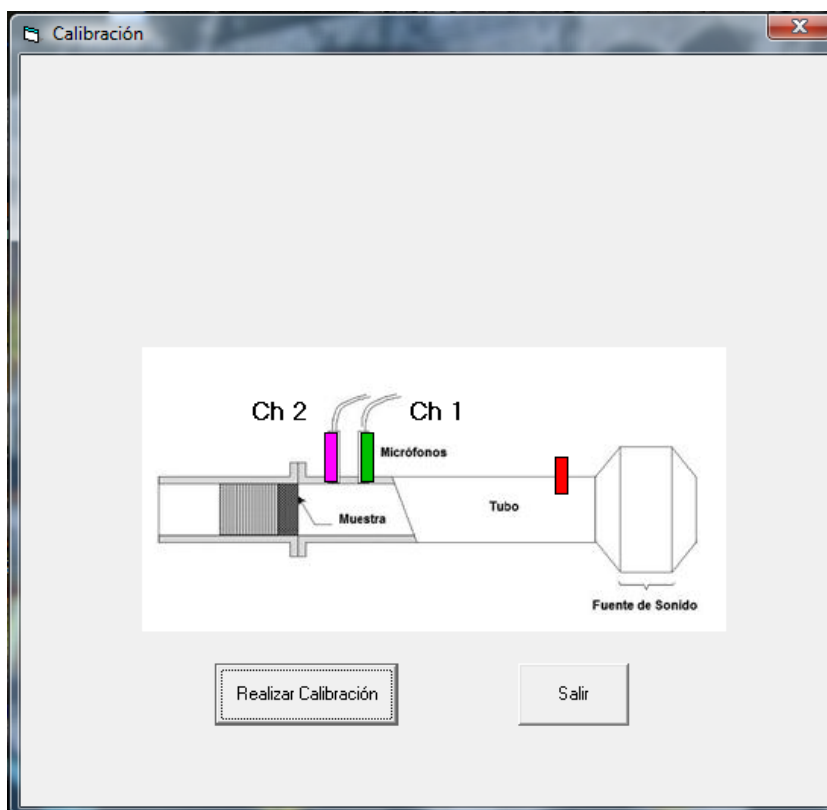


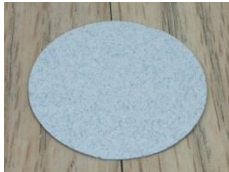















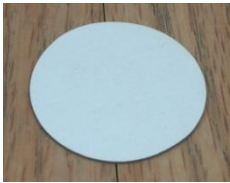
















Fig. A3.38. Ventana para realizar la calibración del tubo de impedancias.
















ANEXO 4

Lista de materiales medidos en tubo de impedancias

1 FABRIANO, 200 GRAMOS 0.02 CM 	2 FABRIANO, 300 GRAMOS 0.04 CM 	3 PAPEL GRANULADO Y TEXTURIZADO 0.02 CM 
4 PAPEL QUEST (GRANULADO), 216 GRAMOS 0.03 CM 	5 PAPEL TEXTURIZADO 0.03 CM 	6 PAPEL GRANULADO Y TEXTURIZADO 0.03 CM 
7 PAPEL HECHO A MANO, 240 GRAMOS 0.03 CM 	8 PAPEL AMATE 0.05 CM 	9 CARTULINA OPALINA, 216 GRAMOS 0.02 CM 
10 SULFATADA INTERNACIONAL, 1 CARA, 14 PUNTOS 0.03 CM 	11 CARTULINA KROMAKOTE, 16 PUNTOS 0.02 CM 	12 CARTULINA COUCHE /CREATOR/, 200 GRAMOS 0.01 CM 

<p>13</p> <p>CARTULINA METALIZADA, 16 PUNTOS, MATE 0.04 CM</p> 	<p>14</p> <p>CARTULINA TEXTURIZADA 0.02 CM</p> 	<p>15</p> <p>CARTÓN 0.12 CM</p> 
<p>16</p> <p>ILUSTRACIÓN 0.11 CM</p> 	<p>17</p> <p>ILUSTRACIÓN 0.11 CM</p> 	<p>18</p> <p>CARTULINA PRIMAVERA, GRUESA 0.11 CM</p> 
<p>19</p> <p>CARTULINA PRIMAVERA, DELGADA 0.07 CM</p> 	<p>20</p> <p>ILUSTRACIÓN CORRUGADO, 2 CARAS 0.15 CM</p> 	<p>21</p> <p>ILUSTRACIÓN CORRUGADO, 1 CARA 0.1 CM</p> 
<p>22</p> <p>BATERIA 0.25 CM</p> 	<p>23</p> <p>BATERIA 0.1 CM</p> 	<p>24</p> <p>CARTÓN COMPRIMIDO, CARTÓN GRIS 0.25 CM</p> 
<p>25</p> <p>CARTÓN COMPRIMIDO, CARTÓN GRIS 0.15 CM</p> 	<p>26</p> <p>CARTÓN CORRUGADO, 2 CARAS, 565 GRAMOS 0.4 CM</p> 	<p>27</p> <p>MICROCORRUGADO KRAFT 0.25 CM</p> 

<p>28</p> <p>MICROCORRUGADO METALIZADO 0.25 CM</p> 	<p>29</p> <p>MAMPARA FOAM BOARD 0.5 CM</p> 	<p>30</p> <p>MAMPARA FOAM BOARD, KRAFT 0.5 CM</p> 
<p>31</p> <p>LIJA DE AGUA, 100 0.05 CM</p> 	<p>32</p> <p>LIJA DE AGUA, 280 0.01 CM</p> 	<p>33</p> <p>LIJA PARA MADERA, NO. DE GRANO 36 0.1 CM</p> 
<p>34</p> <p>LIJA PARA MADERA, NO. DE GRANO 50 0.07 CM</p> 	<p>35</p> <p>LIJA PARA MADERA, NO. DE GRANO 80 0.05 CM</p> 	<p>36</p> <p>LIJA PARA MADERA, NO. DE GRANO 150 0.02 CM</p> 
<p>37</p> <p>LIJA DE ESMERIL, NO. DE GRANO 36 0.15 CM</p> 	<p>38</p> <p>LIJA DE ESMERIL, NO. DE GRANO 50 0.1 CM</p> 	<p>39</p> <p>CORCHO 0.6 CM</p> 
<p>40</p> <p>CORCHO 0.5 CM</p> 	<p>41</p> <p>CORCHO 0.3 CM</p> 	<p>42</p> <p>TRIPLAY 0.9 CM</p> 

<p>43</p> <p>TRIPLAY 0.36 CM</p> 	<p>44</p> <p>CHAPA DE CAOBILLA 0.05 CM</p> 	<p>45</p> <p>MDF 1.2 CM</p> 
<p>46</p> <p>MDF CON ACABADO 0.7 CM</p> 	<p>47</p> <p>MDF 0.3 CM</p> 	<p>48</p> <p>MADERA BALSA, 1/4" 0.64 CM</p> 
<p>49</p> <p>MADERA BALSA, 3/16" 0.47 CM</p> 	<p>50</p> <p>MADERA BALSA, 3/32" 0.23 CM</p> 	<p>51</p> <p>MADERA BALSA, 1/16" 0.15 CM</p> 
<p>52</p> <p>ACRÍLICO 0.9 CM</p> 	<p>53</p> <p>ACRÍLICO 0.43 CM</p> 	<p>54</p> <p>ACRÍLICO 0.3 CM</p> 
<p>55</p> <p>ACRÍLICO 0.15 CM</p> 	<p>56</p> <p>POLIPROPILENO, TEXTURIZADO, 16 PUNTOS 0.03 CM</p> 	<p>57</p> <p>LÁMINA DE ACETATO CRISTAL PARA MAQUETAS 0.03 CM</p> 

<p>58</p> <p>MICA PVC, 15 PUNTOS 0.015 CM</p> 	<p>59</p> <p>ESTIRENO 60 PUNTOS 0.15 CM</p> 	<p>60</p> <p>ESTIRENO 0.05 CM</p> 
<p>61</p> <p>TROVICEL, PVC ESPUMOSO 0.6 CM</p> 	<p>62</p> <p>TROVICEL, PVC ESPUMOSO 0.25 CM</p> 	<p>63</p> <p>LOSETA VINÍLICA 0.13 CM</p> 
<p>64</p> <p>ESPUMA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO 2.0 CM</p> 	<p>65</p> <p>ESPUMA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO 1.0 CM</p> 	<p>66</p> <p>ETILENO ACETATO DE VINIL 0.15 CM</p> 
<p>67</p> <p>ETILENO ACETATO DE VINIL 0.2 CM</p> 	<p>68</p> <p>ETILENO ACETATO DE VINIL, ATERCIOPELADO 0.2 CM</p> 	<p>69</p> <p>ETILENO ACETATO DE VINIL 0.6 CM</p> 
<p>70</p> <p>LINOLEO DE VINIL CON HULE ESPUMA 0.25 CM</p> 	<p>71</p> <p>COJÍN DE VINIL CON HULE ESPUMA 0.4 CM</p> 	<p>72</p> <p>TERCIOPELO, PELO CORTO 0.1 CM</p> 

<p>73</p> <p>TERCIOPELO, PELO LARGO 0.5 CM</p> 	<p>74</p> <p>GAMUCINA, PELO CORTO 0.05 CM</p> 	<p>75</p> <p>FIELTRO 0.25 CM</p> 
<p>76</p> <p>FIELTRO 0.4 CM</p> 	<p>77</p> <p>FIELTRO DURO 0.2 CM</p> 	<p>78</p> <p>LICRA DE ALGODÓN 0.1 CM</p> 
<p>79</p> <p>ALFOMBRA 0.8 CM</p> 	<p>80</p> <p>FIBRA 3M 0.9 CM</p> 	<p>81</p> <p>LÁMINA DE ALUMINIO 0.01 CM</p> 
<p>82</p> <p>FABRIANO, 300 GRAMOS, PEGADO SOBRE MDF DE 12 MM 1.24 CM</p> 	<p>83</p> <p>PAPEL QUEST (GRANULADO), 216 GRAMOS, PEGADO SOBRE MDF DE 12 MM 1.23 CM</p> 	<p>84</p> <p>PAPEL AMATE, PEGADO SOBRE MDF DE 12 MM 1.25 CM</p> 

<p>85</p> <p>CARTULINA KROMEKOTE, 16 PUNTOS, PEGADA SOBRE MDF DE 12 MM 1.22 CM</p> 	<p>86</p> <p>MEZCLA DE POLVO DE MÁRMOL GRUESO CON PINTURA ACRÍLICA SOBRE MDF DE 12 MM 1.6 CM</p> 	<p>87</p> <p>MEZCLA DE ARENA DE MAR CON PINTURA ACRÍLICA SOBRE MDF DE 12 MM 1.45 CM</p> 
<p>88</p> <p>ARENA DE MAR PEGADA CON PEGAMENTO BLANCO SOBRE MDF DE 12 MM 1.35 CM</p> 	<p>89</p> <p>ARENA PARA MAQUETAS PEGADA CON PEGAMENTO BLANCO SOBRE MDF DE 12 MM 1.45 CM</p> 	<p>90</p> <p>PASTO EN POLVO PARA MAQUETAS PEGADO CON PEGAMENTO BLANCO SOBRE MDF DE 12 MM 1.4 CM</p> 
<p>91</p> <p>ESPUMA DE POLIURETANO RÍGIDA 0.5 CM</p> 	<p>92</p> <p>ESPUMA DE POLIURETANO RÍGIDA 1 CM</p> 	<p>93</p> <p>ESPUMA DE POLIURETANO RÍGIDA 1 CM</p> 
<p>94</p> <p>ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE, 40 VISCOLASTIC 1 CM</p> 	<p>95</p> <p>ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE, 20 STD 1 CM</p> 	<p>96</p> <p>ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE, 35 STD 1 CM</p> 

<p>97</p> <p>ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE, 24 FME 1 CM</p> 	<p>98</p> <p>ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE, 24 FME 1.2 CM</p> 	<p>99</p> <p>ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE, 50 RF 1 CM</p> 
<p>100</p> <p>ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE, 50 RF 1.2 CM</p> 	<p>101</p> <p>ESPUMA DE POLIURETANO SUAVE, 90 R 1 CM</p> 	

ANEXO 5

Modos propios de vibración del espacio propuesto a escala 1:1 y 1:10

Dimensiones del espacio (escala 1:1): 4.2 m x 6.3 m x 8.7 m.

largo	ancho	alto	modo propio			largo	ancho	alto	(z)	suma	raiz	v/2	frecuencia
l(x)	l(y)	l(z)	n (x)	n (y)	n (z)	n/l	n/l	n/l	(n/l)^2	(n/l)^2	(n/l)^2	344/2	
8,7	6,3	4,2	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	172,5	0,0
8,7	6,3	4,2	0	0	1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	172,5	41,1
8,7	6,3	4,2	0	0	2	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,2	172,5	82,1
8,7	6,3	4,2	0	0	3	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,5	172,5	123,2
8,7	6,3	4,2	0	0	4	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,9	172,5	164,3
8,7	6,3	4,2	0	1	0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	172,5	27,4
8,7	6,3	4,2	0	1	1	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,1	172,5	49,4
8,7	6,3	4,2	0	1	2	0,0	0,2	0,5	0,0	0,0	0,2	172,5	86,6
8,7	6,3	4,2	0	1	3	0,0	0,2	0,7	0,0	0,0	0,5	172,5	126,2
8,7	6,3	4,2	0	1	4	0,0	0,2	1,0	0,0	0,0	0,9	172,5	166,6
8,7	6,3	4,2	0	2	0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,1	0,0	172,5	54,8
8,7	6,3	4,2	0	2	1	0,0	0,3	0,2	0,0	0,1	0,1	172,5	68,5
8,7	6,3	4,2	0	2	2	0,0	0,3	0,5	0,0	0,1	0,2	172,5	98,7
8,7	6,3	4,2	0	2	3	0,0	0,3	0,7	0,0	0,1	0,5	172,5	134,8
8,7	6,3	4,2	0	2	4	0,0	0,3	1,0	0,0	0,1	0,9	172,5	173,2
8,7	6,3	4,2	0	3	0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,2	0,0	172,5	82,1
8,7	6,3	4,2	0	3	1	0,0	0,5	0,2	0,0	0,2	0,1	172,5	91,8
8,7	6,3	4,2	0	3	2	0,0	0,5	0,5	0,0	0,2	0,2	172,5	116,2
8,7	6,3	4,2	0	3	3	0,0	0,5	0,7	0,0	0,2	0,5	172,5	148,1
8,7	6,3	4,2	0	3	4	0,0	0,5	1,0	0,0	0,2	0,9	172,5	183,7
8,7	6,3	4,2	0	4	0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,4	0,0	172,5	109,5
8,7	6,3	4,2	0	4	1	0,0	0,6	0,2	0,0	0,4	0,1	172,5	117,0
8,7	6,3	4,2	0	4	2	0,0	0,6	0,5	0,0	0,4	0,2	172,5	136,9
8,7	6,3	4,2	0	4	3	0,0	0,6	0,7	0,0	0,4	0,5	172,5	164,9
8,7	6,3	4,2	0	4	4	0,0	0,6	1,0	0,0	0,4	0,9	172,5	197,4
8,7	6,3	4,2	1	0	0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	172,5	19,8
8,7	6,3	4,2	1	0	1	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	172,5	45,6
8,7	6,3	4,2	1	0	2	0,1	0,0	0,5	0,0	0,0	0,2	172,5	84,5
8,7	6,3	4,2	1	0	3	0,1	0,0	0,7	0,0	0,0	0,5	172,5	124,8
8,7	6,3	4,2	1	0	4	0,1	0,0	1,0	0,0	0,0	0,9	172,5	165,5
8,7	6,3	4,2	1	1	0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	172,5	33,8
8,7	6,3	4,2	1	1	1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0	0,1	172,5	53,2
8,7	6,3	4,2	1	1	2	0,1	0,2	0,5	0,0	0,0	0,2	172,5	88,8
8,7	6,3	4,2	1	1	3	0,1	0,2	0,7	0,0	0,0	0,5	172,5	127,8
8,7	6,3	4,2	1	1	4	0,1	0,2	1,0	0,0	0,0	0,9	172,5	167,7
8,7	6,3	4,2	1	2	0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,0	172,5	58,2
8,7	6,3	4,2	1	2	1	0,1	0,3	0,2	0,0	0,1	0,1	172,5	71,3
8,7	6,3	4,2	1	2	2	0,1	0,3	0,5	0,0	0,1	0,2	172,5	100,7
8,7	6,3	4,2	1	2	3	0,1	0,3	0,7	0,0	0,1	0,5	172,5	136,3
8,7	6,3	4,2	1	2	4	0,1	0,3	1,0	0,0	0,1	0,9	172,5	174,3
8,7	6,3	4,2	1	3	0	0,1	0,5	0,0	0,0	0,2	0,0	172,5	84,5
8,7	6,3	4,2	1	3	1	0,1	0,5	0,2	0,0	0,2	0,1	172,5	94,0
8,7	6,3	4,2	1	3	2	0,1	0,5	0,5	0,0	0,2	0,2	172,5	117,8
8,7	6,3	4,2	1	3	3	0,1	0,5	0,7	0,0	0,2	0,5	172,5	149,4
8,7	6,3	4,2	1	3	4	0,1	0,5	1,0	0,0	0,2	0,9	172,5	184,7
8,7	6,3	4,2	1	4	0	0,1	0,6	0,0	0,0	0,4	0,0	172,5	111,3
8,7	6,3	4,2	1	4	1	0,1	0,6	0,2	0,0	0,4	0,1	172,5	118,6
8,7	6,3	4,2	1	4	2	0,1	0,6	0,5	0,0	0,4	0,2	172,5	138,3
8,7	6,3	4,2	1	4	3	0,1	0,6	0,7	0,0	0,4	0,5	172,5	166,0
8,7	6,3	4,2	1	4	4	0,1	0,6	1,0	0,0	0,4	0,9	172,5	198,4
8,7	6,3	4,2	2	0	0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	172,5	39,7
8,7	6,3	4,2	2	0	1	0,2	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1	172,5	57,1
8,7	6,3	4,2	2	0	2	0,2	0,0	0,5	0,1	0,0	0,2	172,5	91,2
8,7	6,3	4,2	2	0	3	0,2	0,0	0,7	0,1	0,0	0,5	172,5	129,4
8,7	6,3	4,2	2	0	4	0,2	0,0	1,0	0,1	0,0	0,9	172,5	169,0
8,7	6,3	4,2	2	1	0	0,2	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	172,5	48,2

8,7	6,3	4,2	2	1	1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1	172,5	63,3
8,7	6,3	4,2	2	1	2	0,2	0,2	0,5	0,1	0,0	0,2	172,5	95,2
8,7	6,3	4,2	2	1	3	0,2	0,2	0,7	0,1	0,0	0,5	172,5	132,3
8,7	6,3	4,2	2	1	4	0,2	0,2	1,0	0,1	0,0	0,9	172,5	171,2
8,7	6,3	4,2	2	2	0	0,2	0,3	0,0	0,1	0,1	0,0	172,5	67,6
8,7	6,3	4,2	2	2	1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	172,5	79,1
8,7	6,3	4,2	2	2	2	0,2	0,3	0,5	0,1	0,1	0,2	172,5	106,4
8,7	6,3	4,2	2	2	3	0,2	0,3	0,7	0,1	0,1	0,5	172,5	140,5
8,7	6,3	4,2	2	2	4	0,2	0,3	1,0	0,1	0,1	0,9	172,5	177,7
8,7	6,3	4,2	2	3	0	0,2	0,5	0,0	0,1	0,2	0,0	172,5	91,2
8,7	6,3	4,2	2	3	1	0,2	0,5	0,2	0,1	0,2	0,1	172,5	100,0
8,7	6,3	4,2	2	3	2	0,2	0,5	0,5	0,1	0,2	0,2	172,5	122,7
8,7	6,3	4,2	2	3	3	0,2	0,5	0,7	0,1	0,2	0,5	172,5	153,3
8,7	6,3	4,2	2	3	4	0,2	0,5	1,0	0,1	0,2	0,9	172,5	187,9
8,7	6,3	4,2	2	4	0	0,2	0,6	0,0	0,1	0,4	0,0	172,5	116,5
8,7	6,3	4,2	2	4	1	0,2	0,6	0,2	0,1	0,4	0,1	172,5	123,5
8,7	6,3	4,2	2	4	2	0,2	0,6	0,5	0,1	0,4	0,2	172,5	142,5
8,7	6,3	4,2	2	4	3	0,2	0,6	0,7	0,1	0,4	0,5	172,5	169,6
8,7	6,3	4,2	2	4	4	0,2	0,6	1,0	0,1	0,4	0,9	172,5	201,4
8,7	6,3	4,2	3	0	0	0,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	172,5	59,5
8,7	6,3	4,2	3	0	1	0,3	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1	172,5	72,3
8,7	6,3	4,2	3	0	2	0,3	0,0	0,5	0,1	0,0	0,2	172,5	101,4
8,7	6,3	4,2	3	0	3	0,3	0,0	0,7	0,1	0,0	0,5	172,5	136,8
8,7	6,3	4,2	3	0	4	0,3	0,0	1,0	0,1	0,0	0,9	172,5	174,7
8,7	6,3	4,2	3	1	0	0,3	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	172,5	65,5
8,7	6,3	4,2	3	1	1	0,3	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1	172,5	77,3
8,7	6,3	4,2	3	1	2	0,3	0,2	0,5	0,1	0,0	0,2	172,5	105,0
8,7	6,3	4,2	3	1	3	0,3	0,2	0,7	0,1	0,0	0,5	172,5	139,5
8,7	6,3	4,2	3	1	4	0,3	0,2	1,0	0,1	0,0	0,9	172,5	176,9
8,7	6,3	4,2	3	2	0	0,3	0,3	0,0	0,1	0,1	0,0	172,5	80,9
8,7	6,3	4,2	3	2	1	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	172,5	90,7
8,7	6,3	4,2	3	2	2	0,3	0,3	0,5	0,1	0,1	0,2	172,5	115,3
8,7	6,3	4,2	3	2	3	0,3	0,3	0,7	0,1	0,1	0,5	172,5	147,4
8,7	6,3	4,2	3	2	4	0,3	0,3	1,0	0,1	0,1	0,9	172,5	183,1
8,7	6,3	4,2	3	3	0	0,3	0,5	0,0	0,1	0,2	0,0	172,5	101,4
8,7	6,3	4,2	3	3	1	0,3	0,5	0,2	0,1	0,2	0,1	172,5	109,4
8,7	6,3	4,2	3	3	2	0,3	0,5	0,5	0,1	0,2	0,2	172,5	130,5
8,7	6,3	4,2	3	3	3	0,3	0,5	0,7	0,1	0,2	0,5	172,5	159,6
8,7	6,3	4,2	3	3	4	0,3	0,5	1,0	0,1	0,2	0,9	172,5	193,1
8,7	6,3	4,2	3	4	0	0,3	0,6	0,0	0,1	0,4	0,0	172,5	124,6
8,7	6,3	4,2	3	4	1	0,3	0,6	0,2	0,1	0,4	0,1	172,5	131,2
8,7	6,3	4,2	3	4	2	0,3	0,6	0,5	0,1	0,4	0,2	172,5	149,3
8,7	6,3	4,2	3	4	3	0,3	0,6	0,7	0,1	0,4	0,5	172,5	175,3
8,7	6,3	4,2	3	4	4	0,3	0,6	1,0	0,1	0,4	0,9	172,5	206,2
8,7	6,3	4,2	4	0	0	0,5	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	172,5	79,3
8,7	6,3	4,2	4	0	1	0,5	0,0	0,2	0,2	0,0	0,1	172,5	89,3
8,7	6,3	4,2	4	0	2	0,5	0,0	0,5	0,2	0,0	0,2	172,5	114,2
8,7	6,3	4,2	4	0	3	0,5	0,0	0,7	0,2	0,0	0,5	172,5	146,5
8,7	6,3	4,2	4	0	4	0,5	0,0	1,0	0,2	0,0	0,9	172,5	182,4
8,7	6,3	4,2	4	1	0	0,5	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	172,5	83,9
8,7	6,3	4,2	4	1	1	0,5	0,2	0,2	0,2	0,0	0,1	172,5	93,4
8,7	6,3	4,2	4	1	2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,0	0,2	172,5	117,4
8,7	6,3	4,2	4	1	3	0,5	0,2	0,7	0,2	0,0	0,5	172,5	149,1
8,7	6,3	4,2	4	1	4	0,5	0,2	1,0	0,2	0,0	0,9	172,5	184,5
8,7	6,3	4,2	4	2	0	0,5	0,3	0,0	0,2	0,1	0,0	172,5	96,4
8,7	6,3	4,2	4	2	1	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	172,5	104,8
8,7	6,3	4,2	4	2	2	0,5	0,3	0,5	0,2	0,1	0,2	172,5	126,6
8,7	6,3	4,2	4	2	3	0,5	0,3	0,7	0,2	0,1	0,5	172,5	156,4
8,7	6,3	4,2	4	2	4	0,5	0,3	1,0	0,2	0,1	0,9	172,5	190,5
8,7	6,3	4,2	4	3	0	0,5	0,5	0,0	0,2	0,2	0,0	172,5	114,2
8,7	6,3	4,2	4	3	1	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,1	172,5	121,3
8,7	6,3	4,2	4	3	2	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	172,5	140,7
8,7	6,3	4,2	4	3	3	0,5	0,5	0,7	0,2	0,2	0,5	172,5	168,0
8,7	6,3	4,2	4	3	4	0,5	0,5	1,0	0,2	0,2	0,9	172,5	200,1
8,7	6,3	4,2	4	4	0	0,5	0,6	0,0	0,2	0,4	0,0	172,5	135,2
8,7	6,3	4,2	4	4	1	0,5	0,6	0,2	0,2	0,4	0,1	172,5	141,3
8,7	6,3	4,2	4	4	2	0,5	0,6	0,5	0,2	0,4	0,2	172,5	158,2
8,7	6,3	4,2	4	4	3	0,5	0,6	0,7	0,2	0,4	0,5	172,5	182,9
8,7	6,3	4,2	4	4	4	0,5	0,6	1,0	0,2	0,4	0,9	172,5	212,8

Dimensiones del espacio (escala 1:10): 42 cm x 63 cm x 87 cm.

largo	ancho	alto	modo propio			largo	ancho	alto	(z)	suma	raiz	v/2	frecuencia
l(x)	l(y)	l(z)	n (x)	n (y)	n (z)	n/l	n/l	n/l	(n/l)^2	(n/l)^2	(n/l)^2	344/2	
0,87	0,63	0,42	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	172,5	0,0
0,87	0,63	0,42	0	0	1	0,0	0,0	2,4	0,0	0,0	5,7	172,5	410,7
0,87	0,63	0,42	0	0	2	0,0	0,0	4,8	0,0	0,0	22,7	172,5	821,4
0,87	0,63	0,42	0	0	3	0,0	0,0	7,1	0,0	0,0	51,0	172,5	1232,1
0,87	0,63	0,42	0	0	4	0,0	0,0	9,5	0,0	0,0	90,7	172,5	1642,9
0,87	0,63	0,42	0	1	0	0,0	1,6	0,0	0,0	2,5	0,0	172,5	273,8
0,87	0,63	0,42	0	1	1	0,0	1,6	2,4	0,0	2,5	5,7	172,5	493,6
0,87	0,63	0,42	0	1	2	0,0	1,6	4,8	0,0	2,5	22,7	172,5	865,9
0,87	0,63	0,42	0	1	3	0,0	1,6	7,1	0,0	2,5	51,0	172,5	1262,2
0,87	0,63	0,42	0	1	4	0,0	1,6	9,5	0,0	2,5	90,7	172,5	1665,5
0,87	0,63	0,42	0	2	0	0,0	3,2	0,0	0,0	10,1	0,0	172,5	547,6
0,87	0,63	0,42	0	2	1	0,0	3,2	2,4	0,0	10,1	5,7	172,5	684,5
0,87	0,63	0,42	0	2	2	0,0	3,2	4,8	0,0	10,1	22,7	172,5	987,2
0,87	0,63	0,42	0	2	3	0,0	3,2	7,1	0,0	10,1	51,0	172,5	1348,4
0,87	0,63	0,42	0	2	4	0,0	3,2	9,5	0,0	10,1	90,7	172,5	1731,7
0,87	0,63	0,42	0	3	0	0,0	4,8	0,0	0,0	22,7	0,0	172,5	821,4
0,87	0,63	0,42	0	3	1	0,0	4,8	2,4	0,0	22,7	5,7	172,5	918,4
0,87	0,63	0,42	0	3	2	0,0	4,8	4,8	0,0	22,7	22,7	172,5	1161,7
0,87	0,63	0,42	0	3	3	0,0	4,8	7,1	0,0	22,7	51,0	172,5	1480,9
0,87	0,63	0,42	0	3	4	0,0	4,8	9,5	0,0	22,7	90,7	172,5	1836,8
0,87	0,63	0,42	0	4	0	0,0	6,3	0,0	0,0	40,3	0,0	172,5	1095,2
0,87	0,63	0,42	0	4	1	0,0	6,3	2,4	0,0	40,3	5,7	172,5	1169,7
0,87	0,63	0,42	0	4	2	0,0	6,3	4,8	0,0	40,3	22,7	172,5	1369,0
0,87	0,63	0,42	0	4	3	0,0	6,3	7,1	0,0	40,3	51,0	172,5	1648,6
0,87	0,63	0,42	0	4	4	0,0	6,3	9,5	0,0	40,3	90,7	172,5	1974,5
0,87	0,63	0,42	1	0	0	1,1	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	172,5	198,3
0,87	0,63	0,42	1	0	1	1,1	0,0	2,4	1,3	0,0	5,7	172,5	456,1
0,87	0,63	0,42	1	0	2	1,1	0,0	4,8	1,3	0,0	22,7	172,5	845,0
0,87	0,63	0,42	1	0	3	1,1	0,0	7,1	1,3	0,0	51,0	172,5	1248,0
0,87	0,63	0,42	1	0	4	1,1	0,0	9,5	1,3	0,0	90,7	172,5	1654,8
0,87	0,63	0,42	1	1	0	1,1	1,6	0,0	1,3	2,5	0,0	172,5	338,1
0,87	0,63	0,42	1	1	1	1,1	1,6	2,4	1,3	2,5	5,7	172,5	532,0
0,87	0,63	0,42	1	1	2	1,1	1,6	4,8	1,3	2,5	22,7	172,5	888,3
0,87	0,63	0,42	1	1	3	1,1	1,6	7,1	1,3	2,5	51,0	172,5	1277,7
0,87	0,63	0,42	1	1	4	1,1	1,6	9,5	1,3	2,5	90,7	172,5	1677,3
0,87	0,63	0,42	1	2	0	1,1	3,2	0,0	1,3	10,1	0,0	172,5	582,4
0,87	0,63	0,42	1	2	1	1,1	3,2	2,4	1,3	10,1	5,7	172,5	712,7
0,87	0,63	0,42	1	2	2	1,1	3,2	4,8	1,3	10,1	22,7	172,5	1006,9
0,87	0,63	0,42	1	2	3	1,1	3,2	7,1	1,3	10,1	51,0	172,5	1362,9
0,87	0,63	0,42	1	2	4	1,1	3,2	9,5	1,3	10,1	90,7	172,5	1743,0
0,87	0,63	0,42	1	3	0	1,1	4,8	0,0	1,3	22,7	0,0	172,5	845,0
0,87	0,63	0,42	1	3	1	1,1	4,8	2,4	1,3	22,7	5,7	172,5	939,5
0,87	0,63	0,42	1	3	2	1,1	4,8	4,8	1,3	22,7	22,7	172,5	1178,5
0,87	0,63	0,42	1	3	3	1,1	4,8	7,1	1,3	22,7	51,0	172,5	1494,1
0,87	0,63	0,42	1	3	4	1,1	4,8	9,5	1,3	22,7	90,7	172,5	1847,4
0,87	0,63	0,42	1	4	0	1,1	6,3	0,0	1,3	40,3	0,0	172,5	1113,0
0,87	0,63	0,42	1	4	1	1,1	6,3	2,4	1,3	40,3	5,7	172,5	1186,4
0,87	0,63	0,42	1	4	2	1,1	6,3	4,8	1,3	40,3	22,7	172,5	1383,3
0,87	0,63	0,42	1	4	3	1,1	6,3	7,1	1,3	40,3	51,0	172,5	1660,4
0,87	0,63	0,42	1	4	4	1,1	6,3	9,5	1,3	40,3	90,7	172,5	1984,4
0,87	0,63	0,42	2	0	0	2,3	0,0	0,0	5,3	0,0	0,0	172,5	396,6
0,87	0,63	0,42	2	0	1	2,3	0,0	2,4	5,3	0,0	5,7	172,5	570,9
0,87	0,63	0,42	2	0	2	2,3	0,0	4,8	5,3	0,0	22,7	172,5	912,1
0,87	0,63	0,42	2	0	3	2,3	0,0	7,1	5,3	0,0	51,0	172,5	1294,4
0,87	0,63	0,42	2	0	4	2,3	0,0	9,5	5,3	0,0	90,7	172,5	1690,0
0,87	0,63	0,42	2	1	0	2,3	1,6	0,0	5,3	2,5	0,0	172,5	481,9
0,87	0,63	0,42	2	1	1	2,3	1,6	2,4	5,3	2,5	5,7	172,5	633,2
0,87	0,63	0,42	2	1	2	2,3	1,6	4,8	5,3	2,5	22,7	172,5	952,3
0,87	0,63	0,42	2	1	3	2,3	1,6	7,1	5,3	2,5	51,0	172,5	1323,0
0,87	0,63	0,42	2	1	4	2,3	1,6	9,5	5,3	2,5	90,7	172,5	1712,1
0,87	0,63	0,42	2	2	0	2,3	3,2	0,0	5,3	10,1	0,0	172,5	676,1
0,87	0,63	0,42	2	2	1	2,3	3,2	2,4	5,3	10,1	5,7	172,5	791,1
0,87	0,63	0,42	2	2	2	2,3	3,2	4,8	5,3	10,1	22,7	172,5	1063,9
0,87	0,63	0,42	2	2	3	2,3	3,2	7,1	5,3	10,1	51,0	172,5	1405,5
0,87	0,63	0,42	2	2	4	2,3	3,2	9,5	5,3	10,1	90,7	172,5	1776,5

0,87	0,63	0,42	2	3	0	2,3	4,8	0,0	5,3	22,7	0,0	172,5	912,1
0,87	0,63	0,42	2	3	1	2,3	4,8	2,4	5,3	22,7	5,7	172,5	1000,3
0,87	0,63	0,42	2	3	2	2,3	4,8	4,8	5,3	22,7	22,7	172,5	1227,5
0,87	0,63	0,42	2	3	3	2,3	4,8	7,1	5,3	22,7	51,0	172,5	1533,0
0,87	0,63	0,42	2	3	4	2,3	4,8	9,5	5,3	22,7	90,7	172,5	1879,1
0,87	0,63	0,42	2	4	0	2,3	6,3	0,0	5,3	40,3	0,0	172,5	1164,8
0,87	0,63	0,42	2	4	1	2,3	6,3	2,4	5,3	40,3	5,7	172,5	1235,1
0,87	0,63	0,42	2	4	2	2,3	6,3	4,8	5,3	40,3	22,7	172,5	1425,3
0,87	0,63	0,42	2	4	3	2,3	6,3	7,1	5,3	40,3	51,0	172,5	1695,6
0,87	0,63	0,42	2	4	4	2,3	6,3	9,5	5,3	40,3	90,7	172,5	2013,9
0,87	0,63	0,42	3	0	0	3,4	0,0	0,0	11,9	0,0	0,0	172,5	594,8
0,87	0,63	0,42	3	0	1	3,4	0,0	2,4	11,9	0,0	5,7	172,5	722,8
0,87	0,63	0,42	3	0	2	3,4	0,0	4,8	11,9	0,0	22,7	172,5	1014,2
0,87	0,63	0,42	3	0	3	3,4	0,0	7,1	11,9	0,0	51,0	172,5	1368,2
0,87	0,63	0,42	3	0	4	3,4	0,0	9,5	11,9	0,0	90,7	172,5	1747,2
0,87	0,63	0,42	3	1	0	3,4	1,6	0,0	11,9	2,5	0,0	172,5	654,8
0,87	0,63	0,42	3	1	1	3,4	1,6	2,4	11,9	2,5	5,7	172,5	773,0
0,87	0,63	0,42	3	1	2	3,4	1,6	4,8	11,9	2,5	22,7	172,5	1050,5
0,87	0,63	0,42	3	1	3	3,4	1,6	7,1	11,9	2,5	51,0	172,5	1395,3
0,87	0,63	0,42	3	1	4	3,4	1,6	9,5	11,9	2,5	90,7	172,5	1768,6
0,87	0,63	0,42	3	2	0	3,4	3,2	0,0	11,9	10,1	0,0	172,5	808,5
0,87	0,63	0,42	3	2	1	3,4	3,2	2,4	11,9	10,1	5,7	172,5	906,9
0,87	0,63	0,42	3	2	2	3,4	3,2	4,8	11,9	10,1	22,7	172,5	1152,6
0,87	0,63	0,42	3	2	3	3,4	3,2	7,1	11,9	10,1	51,0	172,5	1473,7
0,87	0,63	0,42	3	2	4	3,4	3,2	9,5	11,9	10,1	90,7	172,5	1831,0
0,87	0,63	0,42	3	3	0	3,4	4,8	0,0	11,9	22,7	0,0	172,5	1014,2
0,87	0,63	0,42	3	3	1	3,4	4,8	2,4	11,9	22,7	5,7	172,5	1094,2
0,87	0,63	0,42	3	3	2	3,4	4,8	4,8	11,9	22,7	22,7	172,5	1305,1
0,87	0,63	0,42	3	3	3	3,4	4,8	7,1	11,9	22,7	51,0	172,5	1595,9
0,87	0,63	0,42	3	3	4	3,4	4,8	9,5	11,9	22,7	90,7	172,5	1930,7
0,87	0,63	0,42	3	4	0	3,4	6,3	0,0	11,9	40,3	0,0	172,5	1246,3
0,87	0,63	0,42	3	4	1	3,4	6,3	2,4	11,9	40,3	5,7	172,5	1312,3
0,87	0,63	0,42	3	4	2	3,4	6,3	4,8	11,9	40,3	22,7	172,5	1492,7
0,87	0,63	0,42	3	4	3	3,4	6,3	7,1	11,9	40,3	51,0	172,5	1752,6
0,87	0,63	0,42	3	4	4	3,4	6,3	9,5	11,9	40,3	90,7	172,5	2062,1
0,87	0,63	0,42	4	0	0	4,6	0,0	0,0	21,1	0,0	0,0	172,5	793,1
0,87	0,63	0,42	4	0	1	4,6	0,0	2,4	21,1	0,0	5,7	172,5	893,1
0,87	0,63	0,42	4	0	2	4,6	0,0	4,8	21,1	0,0	22,7	172,5	1141,8
0,87	0,63	0,42	4	0	3	4,6	0,0	7,1	21,1	0,0	51,0	172,5	1465,3
0,87	0,63	0,42	4	0	4	4,6	0,0	9,5	21,1	0,0	90,7	172,5	1824,3
0,87	0,63	0,42	4	1	0	4,6	1,6	0,0	21,1	2,5	0,0	172,5	839,0
0,87	0,63	0,42	4	1	1	4,6	1,6	2,4	21,1	2,5	5,7	172,5	934,2
0,87	0,63	0,42	4	1	2	4,6	1,6	4,8	21,1	2,5	22,7	172,5	1174,2
0,87	0,63	0,42	4	1	3	4,6	1,6	7,1	21,1	2,5	51,0	172,5	1490,7
0,87	0,63	0,42	4	1	4	4,6	1,6	9,5	21,1	2,5	90,7	172,5	1844,7
0,87	0,63	0,42	4	2	0	4,6	3,2	0,0	21,1	10,1	0,0	172,5	963,8
0,87	0,63	0,42	4	2	1	4,6	3,2	2,4	21,1	10,1	5,7	172,5	1047,7
0,87	0,63	0,42	4	2	2	4,6	3,2	4,8	21,1	10,1	22,7	172,5	1266,4
0,87	0,63	0,42	4	2	3	4,6	3,2	7,1	21,1	10,1	51,0	172,5	1564,3
0,87	0,63	0,42	4	2	4	4,6	3,2	9,5	21,1	10,1	90,7	172,5	1904,7
0,87	0,63	0,42	4	3	0	4,6	4,8	0,0	21,1	22,7	0,0	172,5	1141,8
0,87	0,63	0,42	4	3	1	4,6	4,8	2,4	21,1	22,7	5,7	172,5	1213,4
0,87	0,63	0,42	4	3	2	4,6	4,8	4,8	21,1	22,7	22,7	172,5	1406,6
0,87	0,63	0,42	4	3	3	4,6	4,8	7,1	21,1	22,7	51,0	172,5	1679,9
0,87	0,63	0,42	4	3	4	4,6	4,8	9,5	21,1	22,7	90,7	172,5	2000,7
0,87	0,63	0,42	4	4	0	4,6	6,3	0,0	21,1	40,3	0,0	172,5	1352,2
0,87	0,63	0,42	4	4	1	4,6	6,3	2,4	21,1	40,3	5,7	172,5	1413,2
0,87	0,63	0,42	4	4	2	4,6	6,3	4,8	21,1	40,3	22,7	172,5	1582,2
0,87	0,63	0,42	4	4	3	4,6	6,3	7,1	21,1	40,3	51,0	172,5	1829,4
0,87	0,63	0,42	4	4	4	4,6	6,3	9,5	21,1	40,3	90,7	172,5	2127,8

ANEXO 6

Proceso de caracterización de fuente sonora en miniatura

1. Primero se definió el espacio donde se realizaría la caracterización de la fuente. Para ello se consideró la Norma ISO 3382, donde especifica que el espacio debe tener características de campo libre.

En este caso, las mediciones se realizaron en la cámara sonoamortiguada del LADAc (más detalles González, 2009, p. 58 a 59), la cual simula un campo libre al ser todos los muros y techo de material altamente absorbente y el piso de material reflejante (Fig. A6.1).



Fig. A6.1. Cámara sonoamortiguada del LADAc.

2. Posteriormente se determinó la distancia entre la fuente y el micrófono, para ello se consultó la Norma ISO 3382, donde establece que la distancia mínima entre la fuente y el micrófono debe ser de 1.5 m, lo cual en escala 1:10 corresponde a 0.15 m, o bien 15 cm.

- Después de haber definido la distancia, se trazó una circunferencia de 15 cm de radio. Luego se dividió a cada 15° , ya que en el software *CATT-Acoustic*, se solicitan datos a cada 15° para caracterizar una fuente (Fig. A6.2), aunque la norma sugiere mediciones a cada 30° .

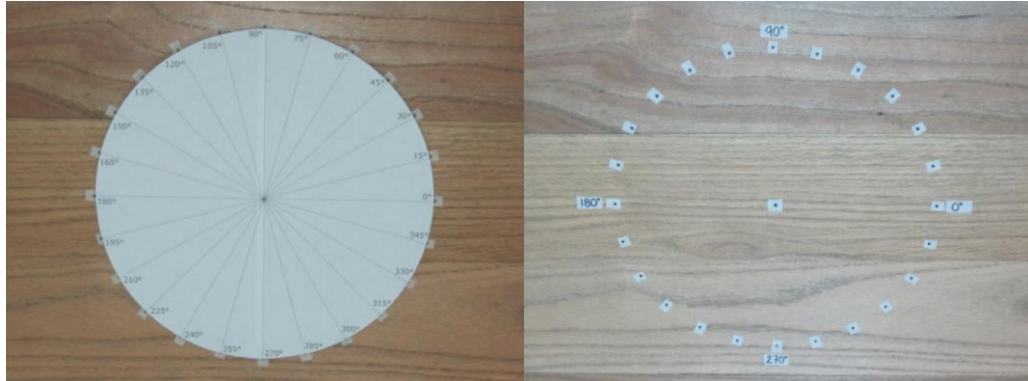


Fig. A6.2. Trazo y división de circunferencia a cada 15° .

- Por último se colocaron la fuente y el micrófono en el primer punto, el cual corresponde a los 0° . La fuente quedó viendo hacia el micrófono y viceversa, como se observa en la figura A6.3. A partir de este punto, se comenzó a medir el nivel de presión sonora alrededor de la fuente, girando el micrófono en cada punto marcado en la circunferencia hasta llegar a los 180° (Fig. A6.4). Se realizaron mediciones en las frecuencias de 1.25 kHz, 2 kHz, 2.5 kHz, 4 kHz, 5 kHz, 10 kHz y 20 kHz, durante 4 segundos por medición.

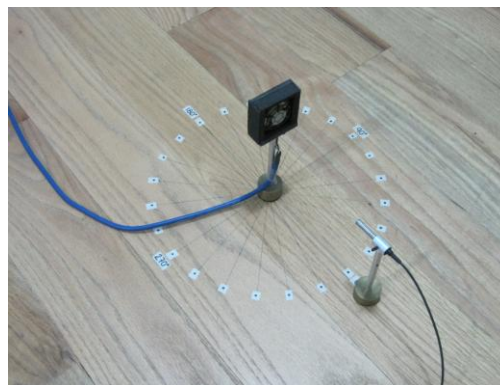


Fig. A6.3. Colocación de la fuente y micrófono.

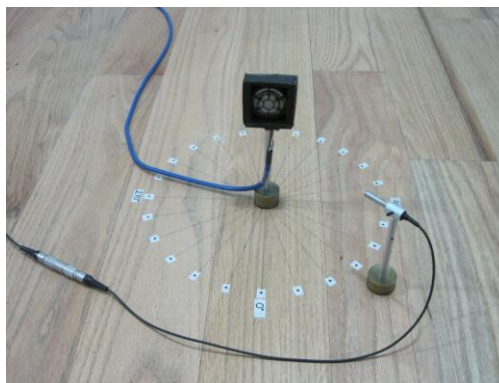


Fig. A6.4. Rotación del micrófono alrededor de la fuente sonora en miniatura.

5. Como resultado, se obtuvo una gráfica polar (Fig. A6.5), a partir de la introducción de datos en una base de datos proporcionada por la Arq. Elisa Garay¹. En esta gráfica se observa el comportamiento de la fuente.

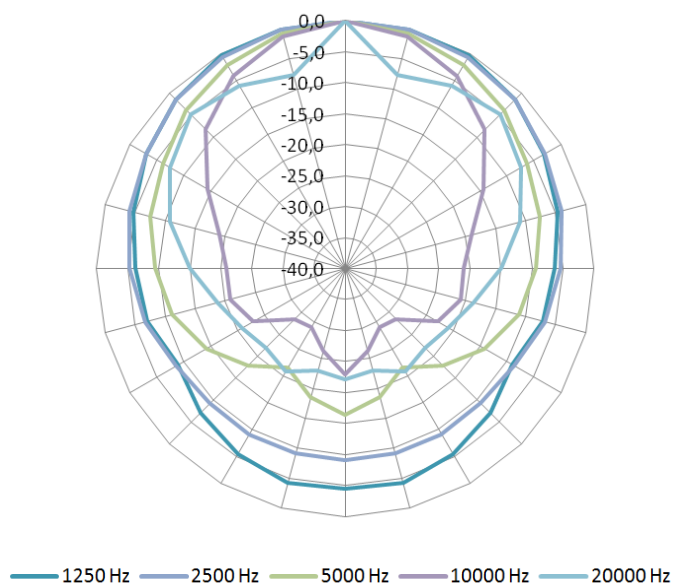


Fig. A6.5. Gráfica polar de la fuente sonora en miniatura.

¹ Maestra en Diseño y profesora de tiempo completo en la Universidad Autónoma Metropolitana, en temas relacionados con el confort y diseño acústico.

La tabla A6.1, muestra los valores obtenidos en decibeles (dB) y la tabla A6.2, muestra los valores a graficar para obtener la gráfica polar, tanto en la base de datos, como en el software *CATT-Acoustics*, para la caracterización de la fuente.

Grados	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	165	150	135	120	105	90	75	60	45	30	15
1250 Hz	71,6	71,5	71,4	70,2	68,5	66,9	65,3	64,5	62,6	64,6	66,1	67,4	67,2	67,4	66,1	64,6	62,6	64,5	65,3	66,9	68,5	70,2	71,4	71,5
2500 Hz	81,7	81,6	81,1	80,2	78,7	77,7	76,4	75,0	73,1	72,5	72,6	72,6	72,6	72,6	72,6	72,5	73,1	75,0	76,4	77,7	78,7	80,2	81,1	81,6
5000 Hz	78,8	78,0	76,8	75,0	72,6	71,2	69,4	67,6	64,6	61,0	57,2	60,3	62,4	60,3	57,2	61,0	64,6	67,6	69,4	71,2	72,6	75,0	76,8	78,0
10000 Hz	80,5	79,3	76,4	72,2	66,1	61,5	59,6	59,7	57,7	52,0	51,4	54,3	57,6	54,3	51,4	52,0	57,7	59,7	59,6	61,5	66,1	72,2	76,4	79,3
20000 Hz	63,3	55,6	57,4	58,5	55,8	52,5	48,4	44,6	42,4	41,5	42,5	40,4	41,1	40,4	42,5	41,5	42,4	44,6	48,4	52,5	55,8	58,5	57,4	55,6

Tabla A6.1. Valores en decibeles.

Grados	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	165	150	135	120	105	90	75	60	45	30	15
1250 Hz	0,0	-0,1	-0,2	-1,4	-3,1	-4,7	-6,3	-7,1	-9,0	-7,0	-5,5	-4,2	-4,4	-4,2	-5,5	-7,0	-9,0	-7,1	-6,3	-4,7	-3,1	-1,4	-0,2	-0,1
2500 Hz	0,0	-0,1	-0,6	-1,5	-3,0	-4,0	-5,3	-6,7	-8,6	-9,2	-9,1	-9,1	-9,1	-9,1	-9,1	-9,2	-8,6	-6,7	-5,3	-4,0	-3,0	-1,5	-0,6	-0,1
5000 Hz	0,0	-0,8	-2,0	-3,8	-6,2	-7,6	-9,4	-11,2	-14,2	-17,8	-21,6	-18,5	-16,4	-18,5	-21,6	-17,8	-14,2	-11,2	-9,4	-7,6	-6,2	-3,8	-2,0	-0,8
10000 Hz	0,0	-1,2	-4,1	-8,3	-14,4	-19,0	-20,9	-20,8	-22,8	-28,5	-29,1	-26,2	-22,9	-26,2	-29,1	-28,5	-22,8	-20,8	-20,9	-19,0	-14,4	-8,3	-4,1	-1,2
20000 Hz	0,0	-7,7	-5,9	-4,8	-7,5	-10,8	-14,9	-18,7	-20,9	-21,8	-20,8	-22,9	-22,2	-22,9	-20,8	-21,8	-20,9	-18,7	-14,9	-10,8	-7,5	-4,8	-5,9	-7,7

Tabla A6.2. Valores para graficar.

ANEXO 7

Caracterización de la fuente sonora en el CATT-Acoustics

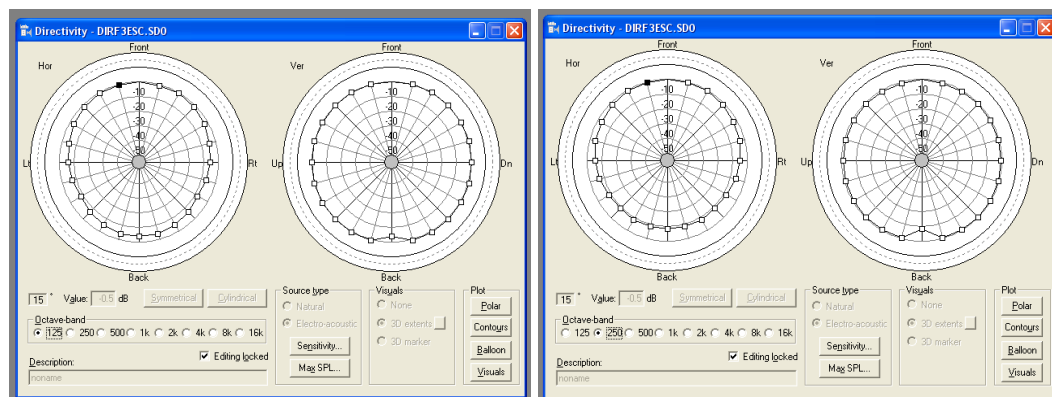


Fig. A7.1 y A7.2. Valores en 125 y 250 Hz.

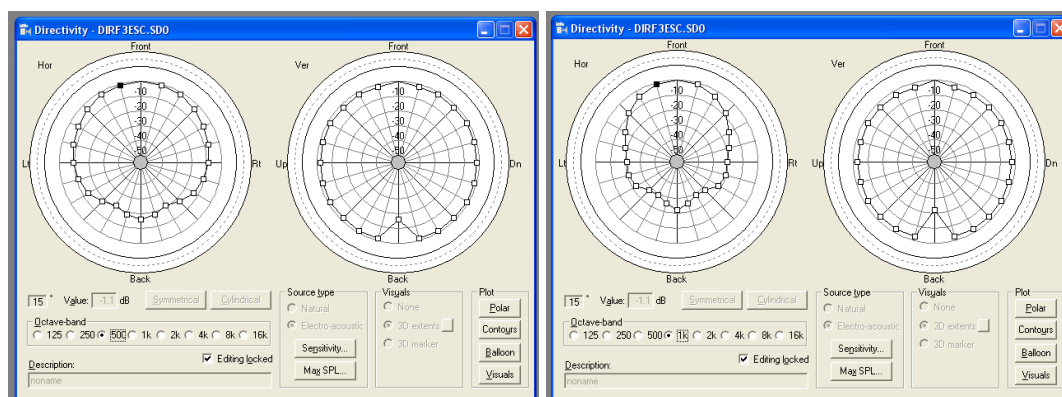


Fig. A7.3 y A7.4. Valores en 500 y 1 000 Hz.

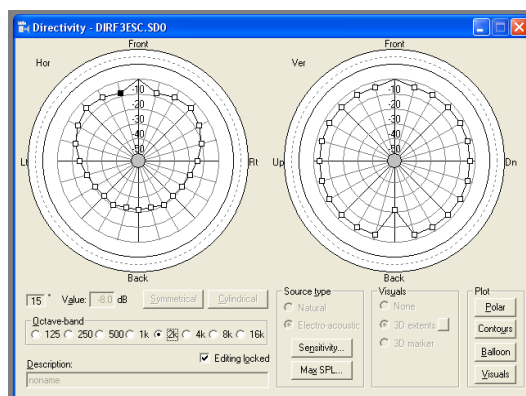


Fig. A7.5. Valores en 2 000 Hz.

ANEXO 8

Comunicación establecida mediante correo electrónico con Jin Yong Jeon

Dear Jin Yong Jeon - Doubt - scale models

Ocultar detalles

DE: [laura lancon](#)

Lunes, 7 de noviembre, 2011 11:47:11

PARA: [jyjeon@hanyang.ac.kr](#)

Dear Jin Yong Jeon,

My name is Laura Lancón. I'm from Mexico City and I'm doing my master studies in environmental desing focused on acoustic comfort.

"Characterization of the sound absorption in scale models" is the subject of my thesis. I read your article "Influence of absorption properties of materials on the accuracy of simulated acoustical measures in 1:10 scale model test" and I have just a question: ¿How did you consider the frequency in scale 1:10?, ¿500 Hz (in real scale) is equal to 5000 Hz (in scale model), 1000 Hz (in real scale) is equal to 10000 Hz (in scale model), etc.? or ¿500 Hz (in real scale) is equal to 500 Hz (in scale model), 1000 Hz (in real scale) is equal to 1000 Hz (in scale model), etc.?

This definitely comes to mind, because I have read other articles and I have found that sound such as frequency bands have been scaled.

I have developed an impedance tube and I have measured the absorption coefficient of many materials used un scale models. I have constructed a scale model of a classroom, but the reverberation time measured in the scale model as in computer simulation has differed a lot between both.

I hope to get a response from you and not take too much of your time.

Thank you and nice to write to you.

Arq. Laura Lancón Rivera
Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico (LADAc)
Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco
México DF.

RE: Dear Jin Yong Jeon - Doubt - scale models

Ocultar detalles

DE: [Jin Yong Jeon](#)

Lunes, 7 de noviembre, 2011 19:37:48

PARA: ["laura lancon"](#)

Dear Laura,

The scale models that we made were scaled down according to the relevant scales. So, what we used for 1:10 scale measurements is maximum 40k for 4kHz. I feel that your difference in models seems to be due to directional incidence. I recommend 1:10 reverberant chamber to measure coefficients.

Best wishes

Jin

++++
Professor Jin Yong Jeon
Department of Architectural Engineering
Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
Tel. 82-2-2220-1795, Fax. 82-2-2220-4794
<http://acoustics.hanyang.ac.kr>
++++

Re: Dear Jin Yong Jeon - Doubt - scale models

Ocultar detalles

DE: [laura lancon](#)

Martes, 15 de noviembre, 2011 0:19:06

PARA: [Jin Yong Jeon](#)

Dear Jin Yong Jeon

Thanks for your time and recommendation.

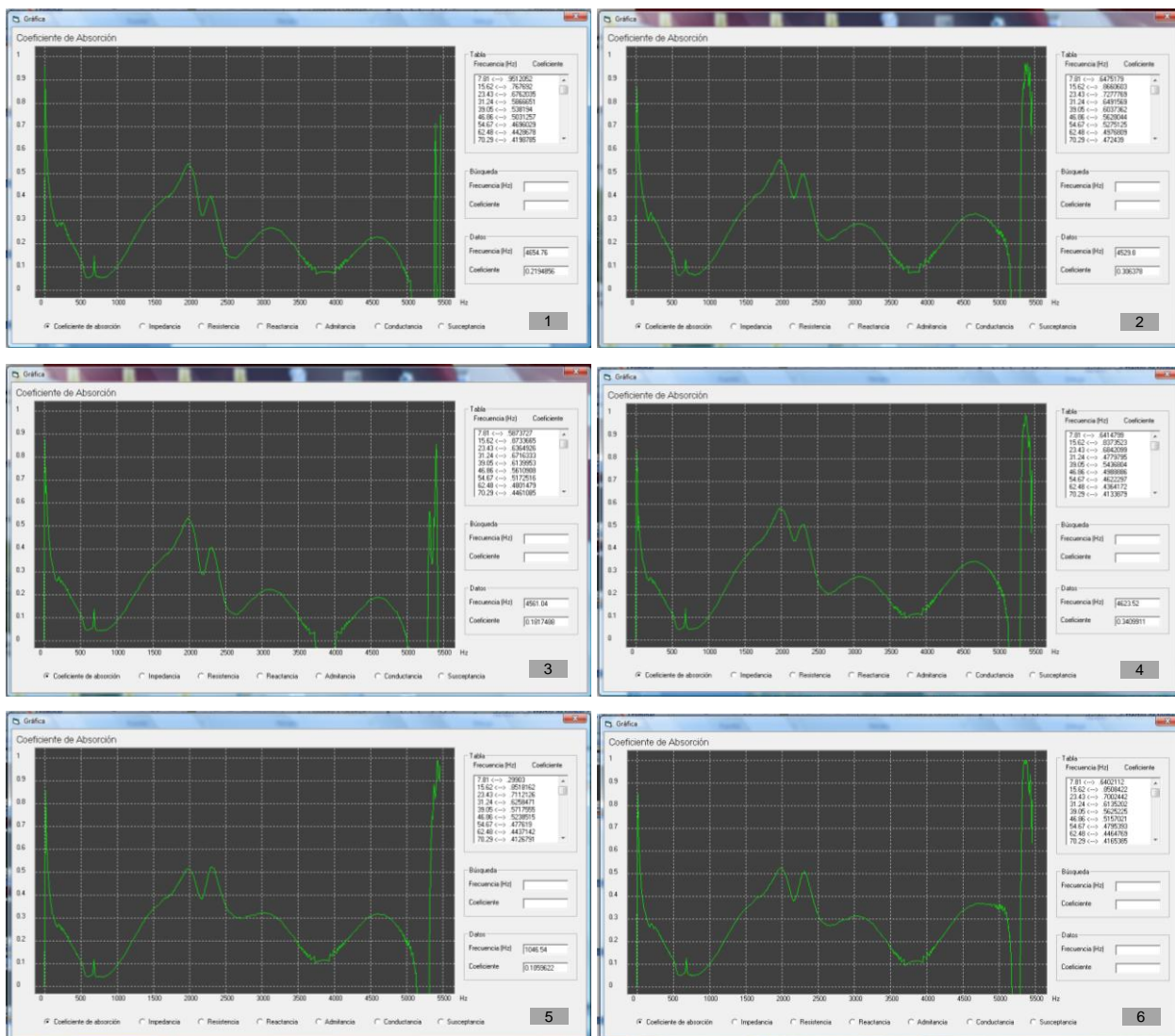
We will consider the development of a 1:10 reverberant chamber for the following research in our laboratory and share with you the results.

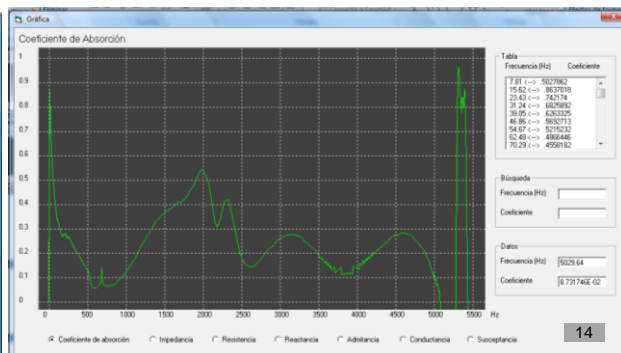
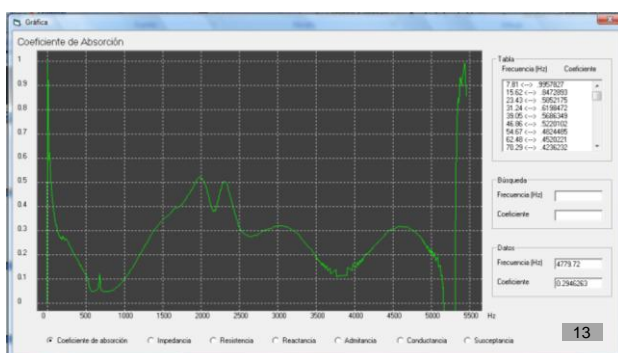
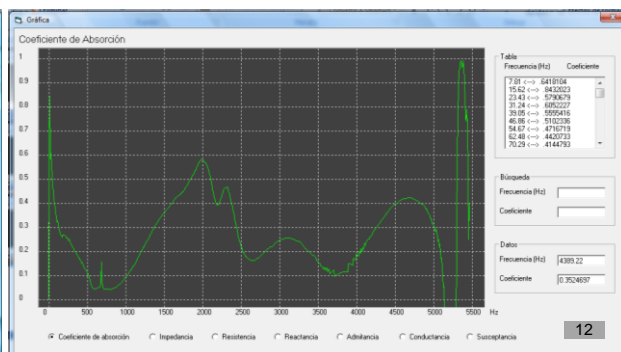
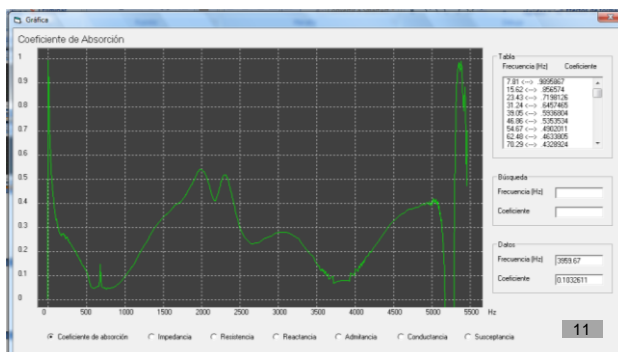
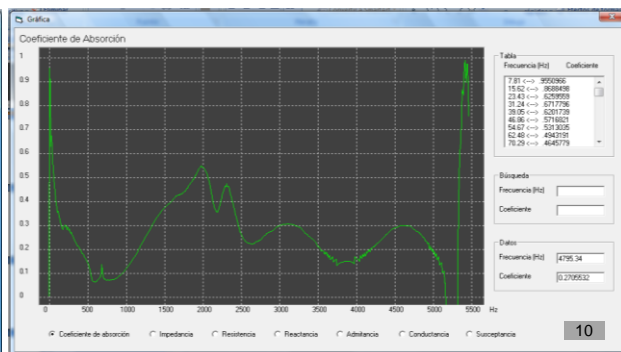
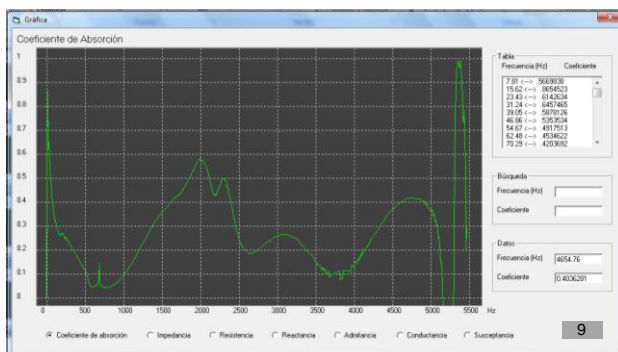
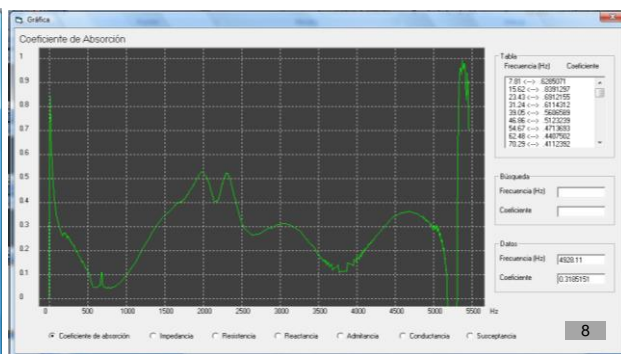
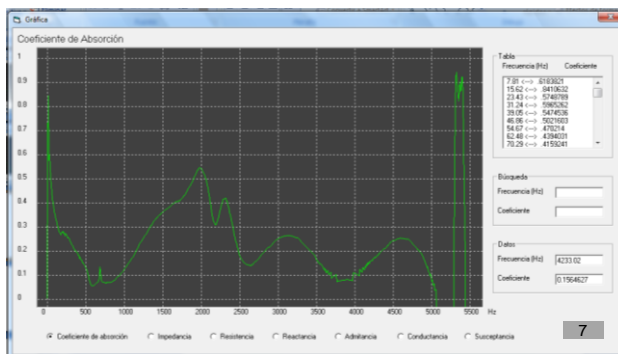
Thank you again

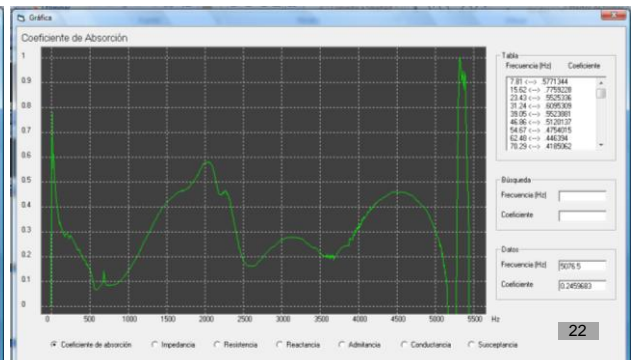
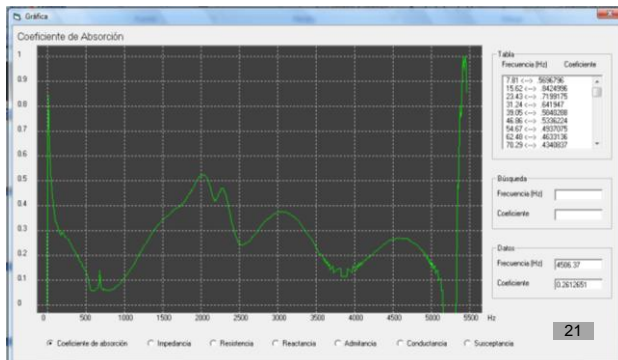
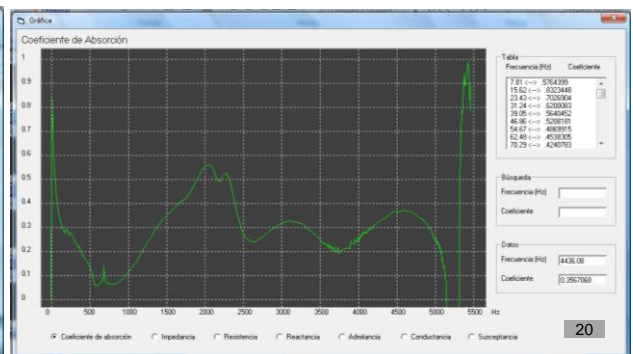
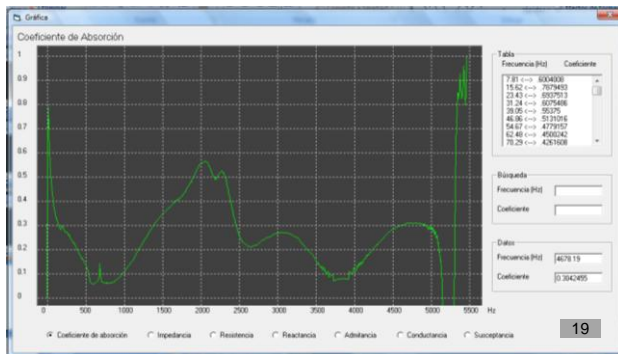
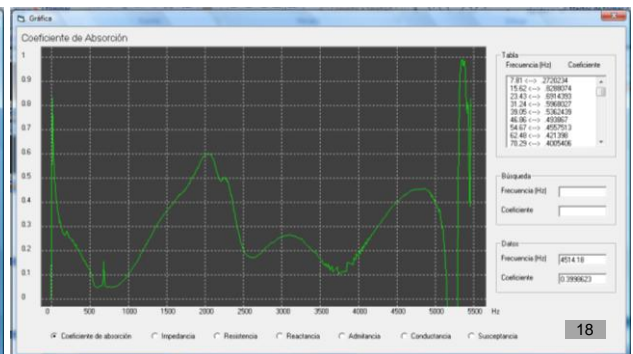
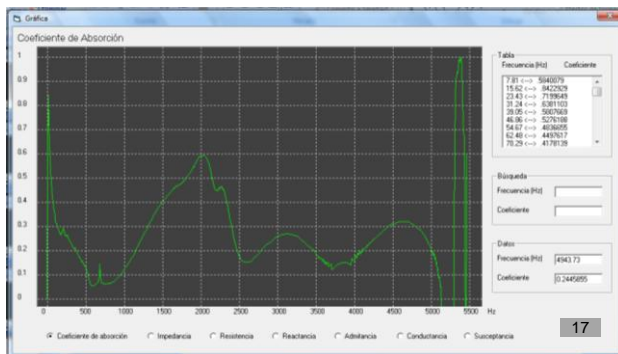
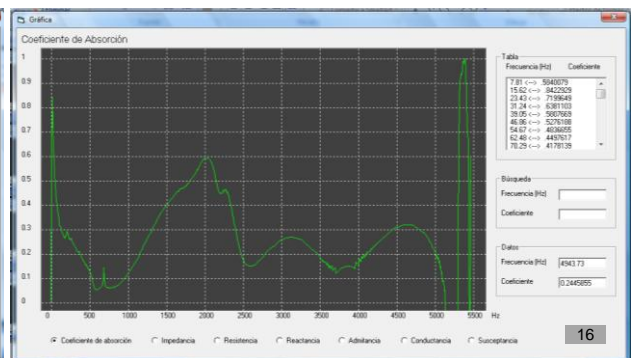
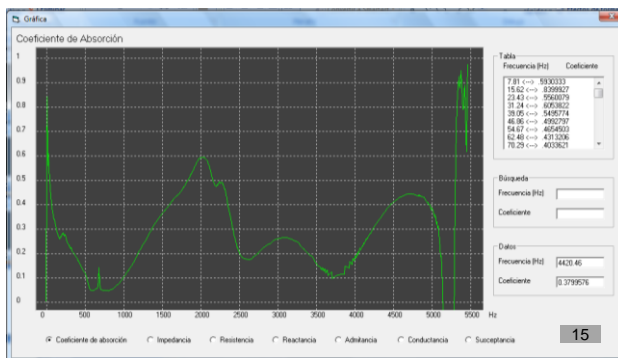
Arq. Laura Lancón Rivera
Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico (LADAc)
Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco
México DF.

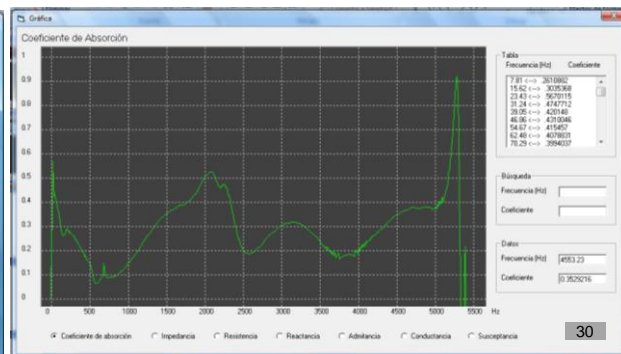
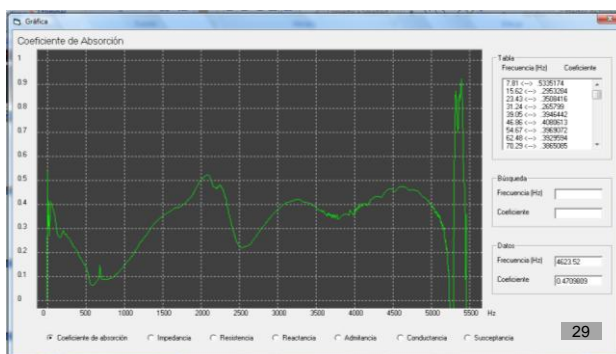
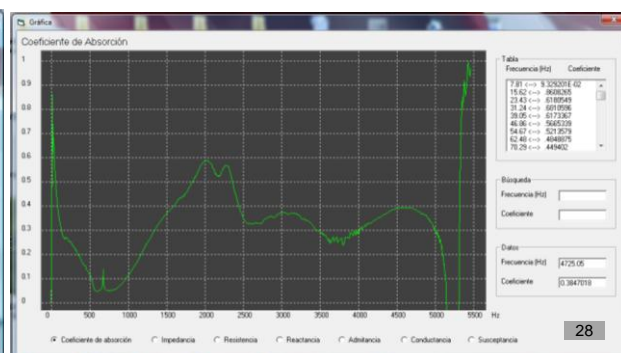
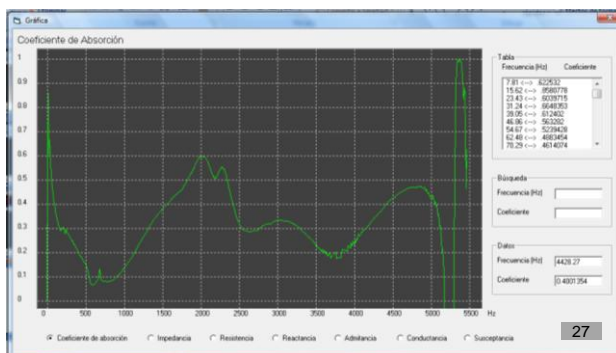
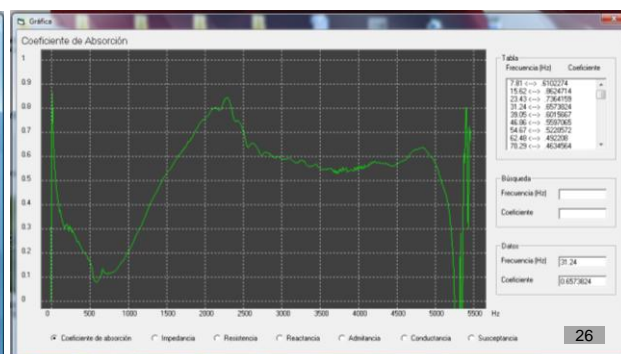
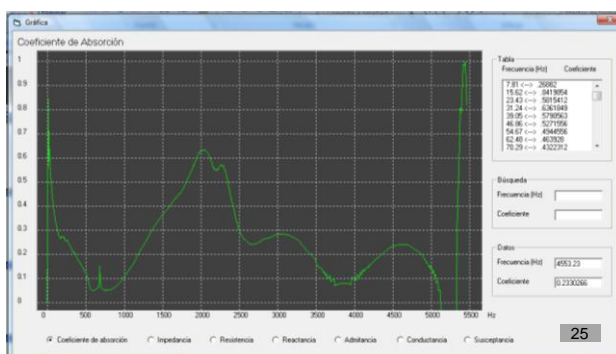
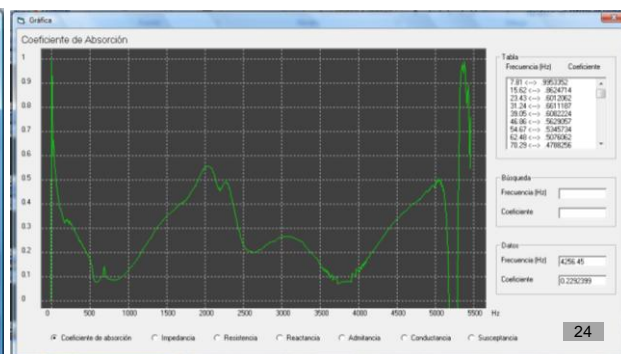
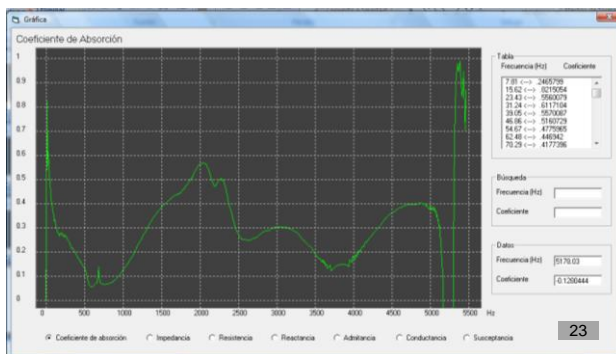
ANEXO 9

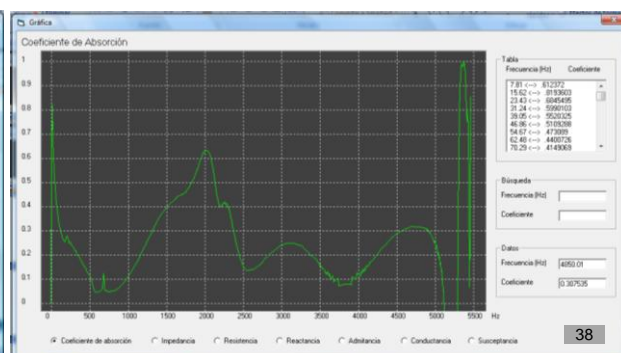
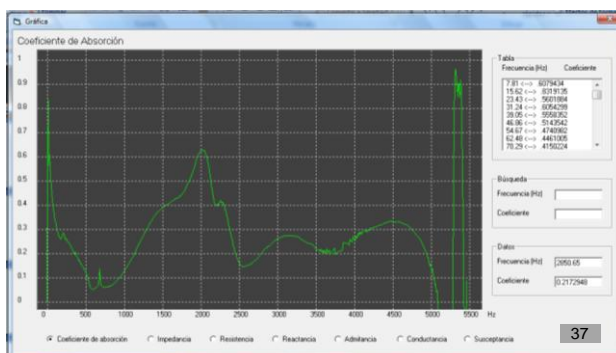
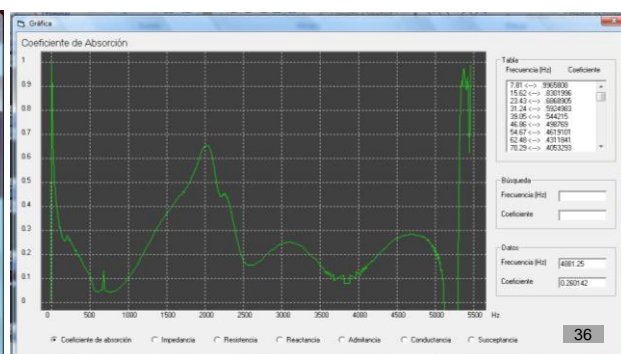
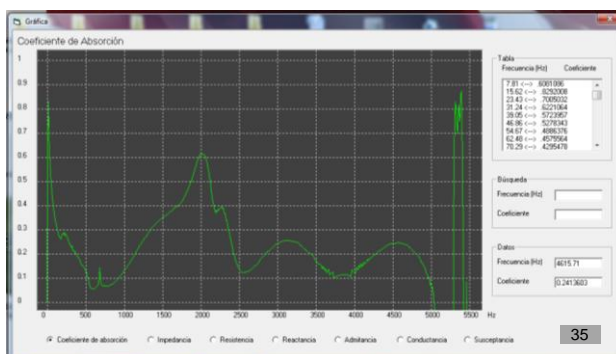
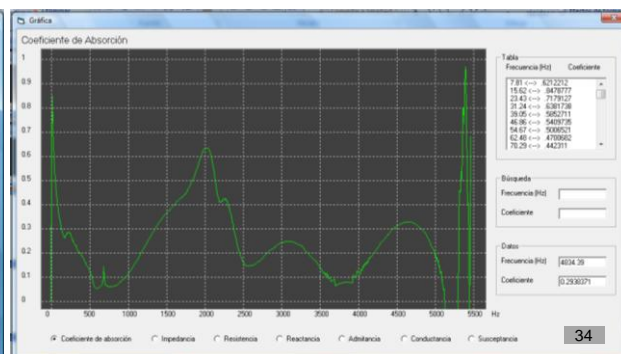
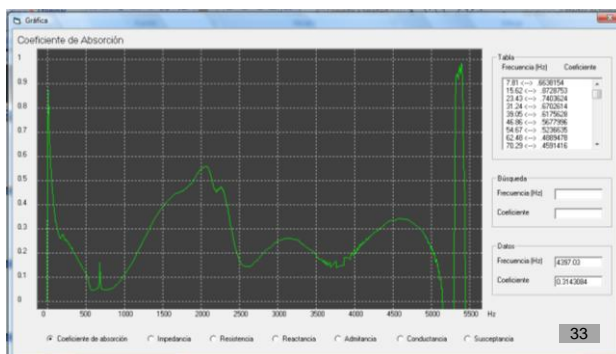
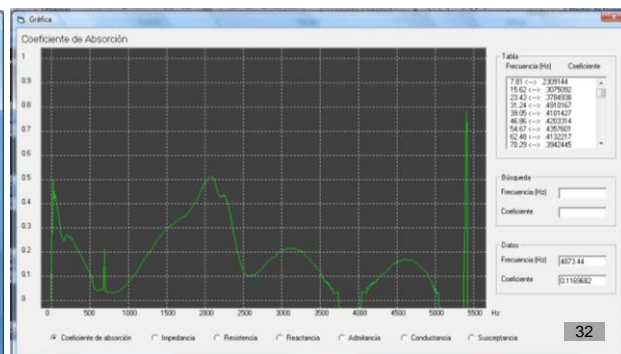
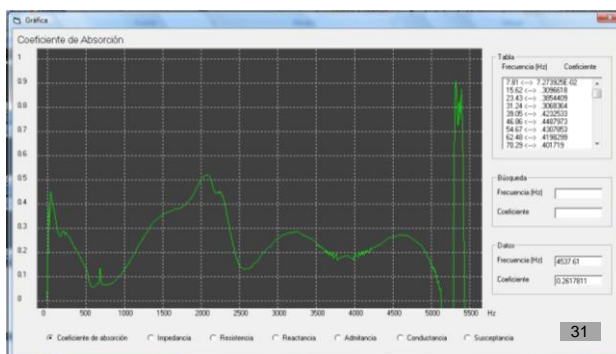
Gráficas del coeficiente de absorción sonora de los materiales medidos en tubo de impedancias

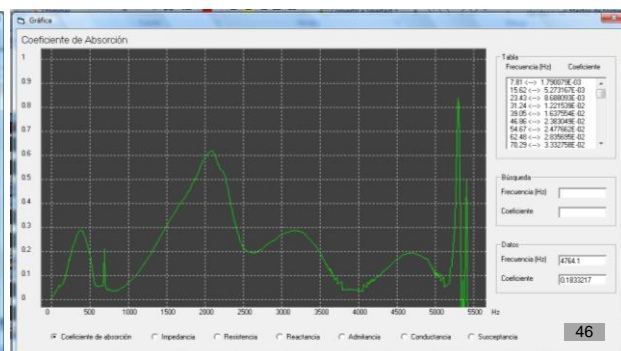
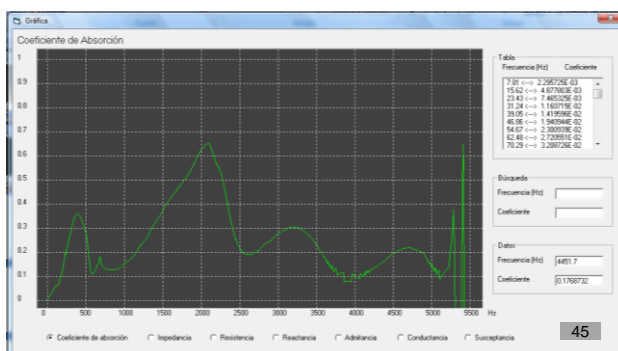
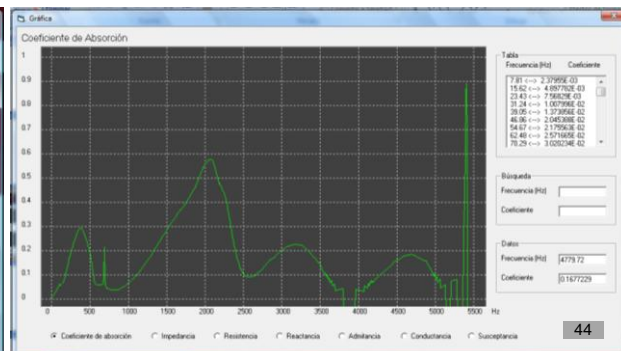
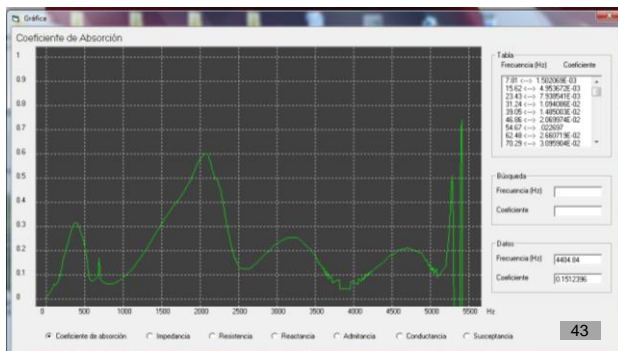
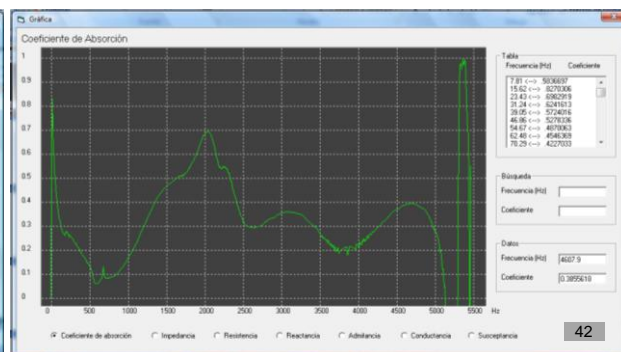
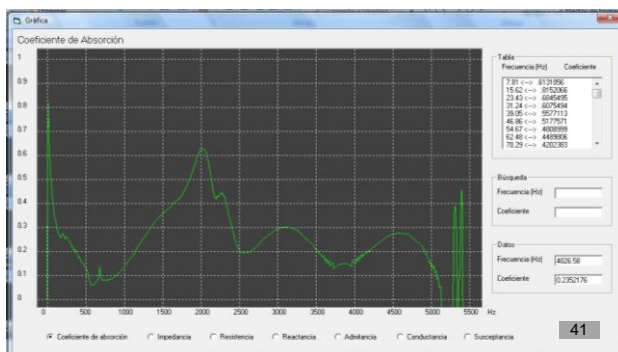
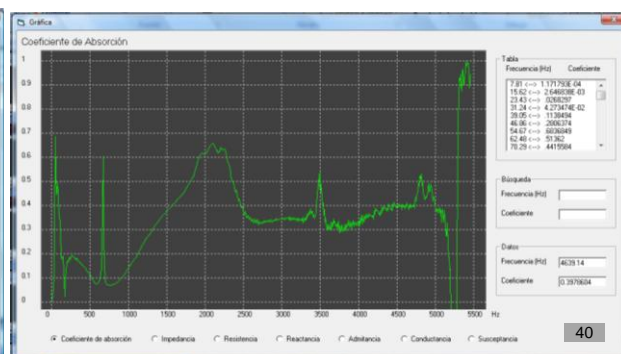
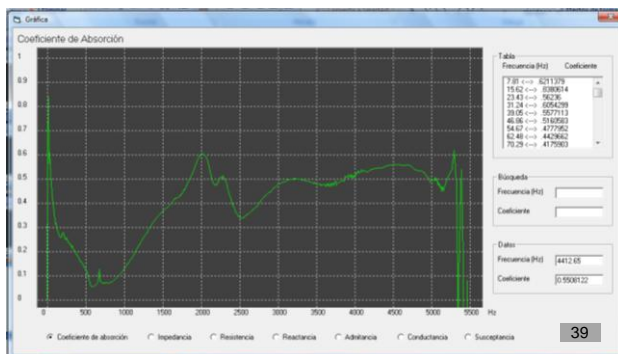


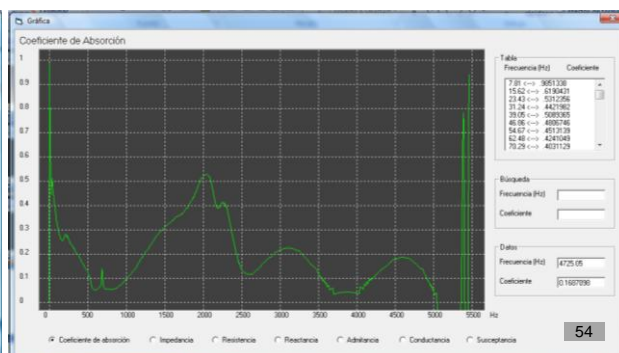
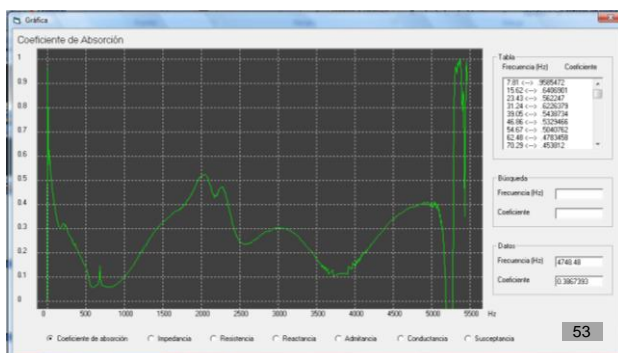
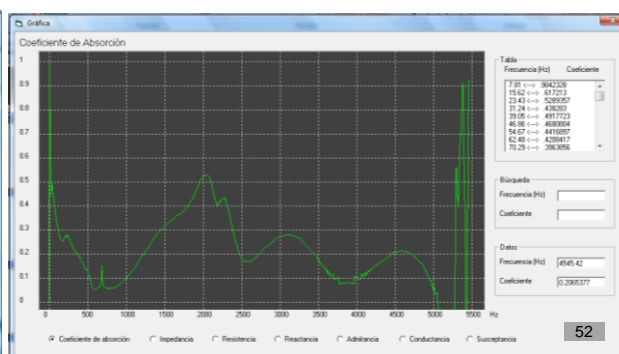
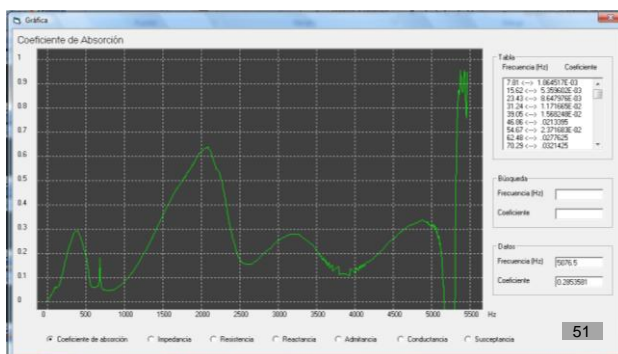
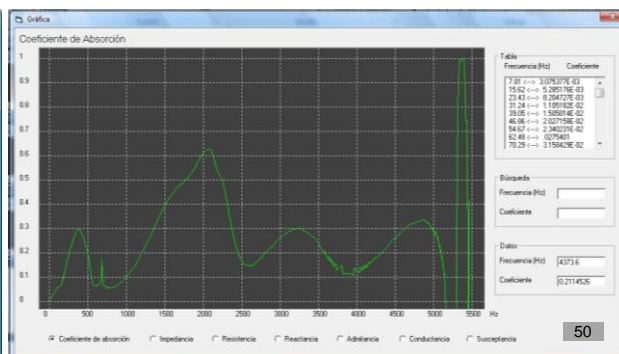
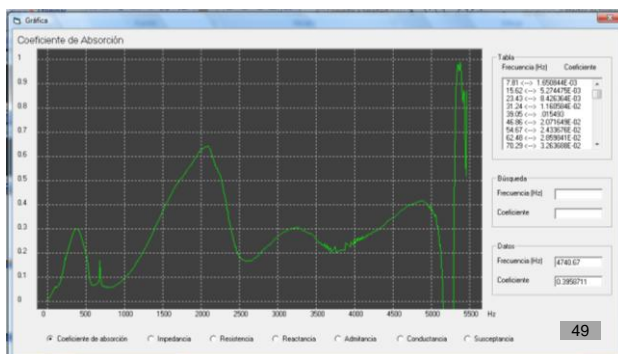
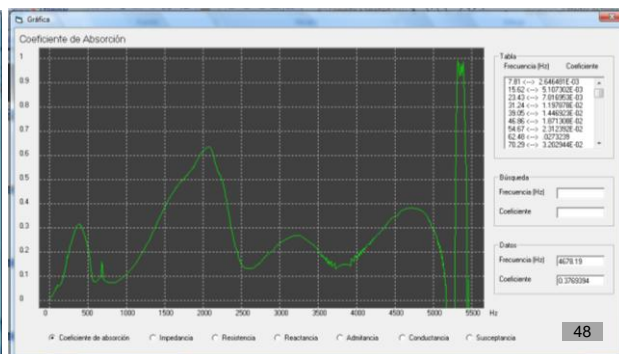
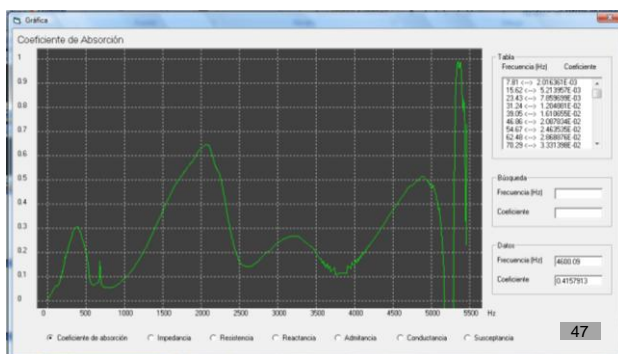


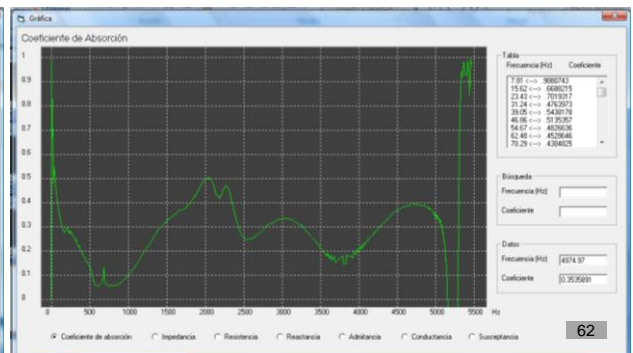
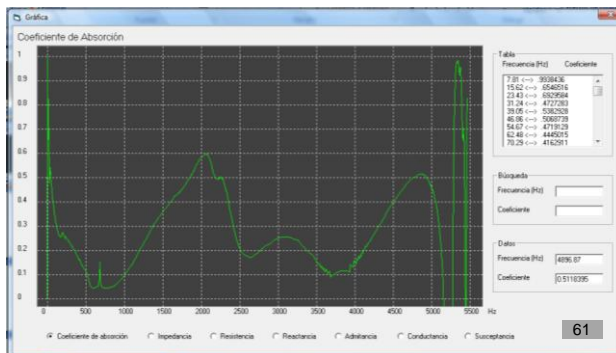
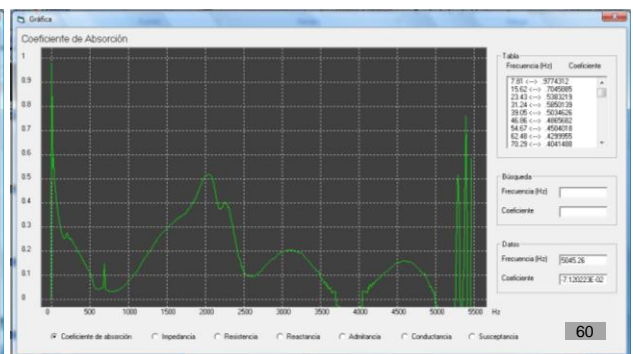
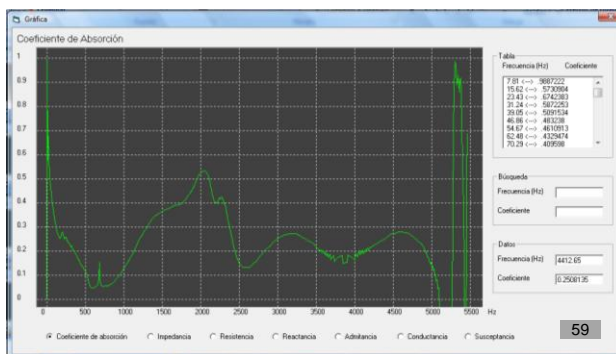
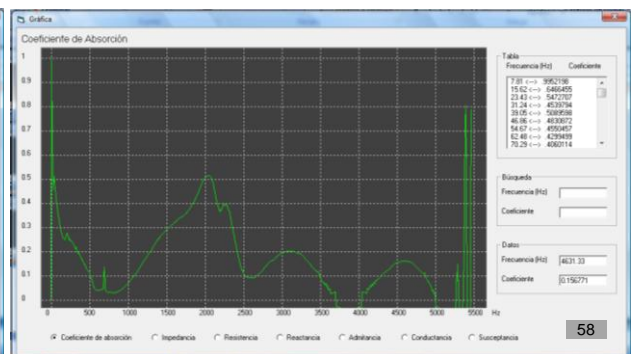
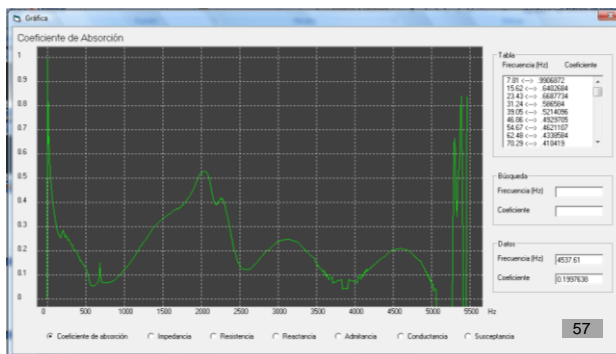
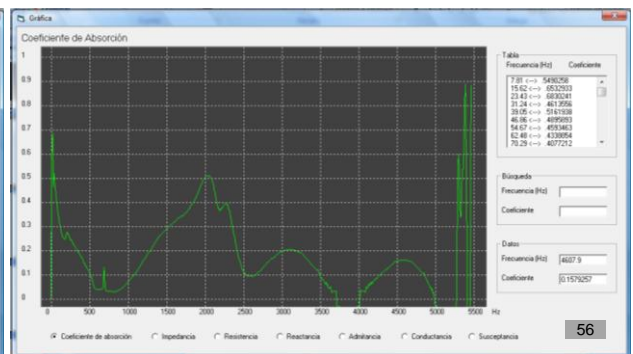
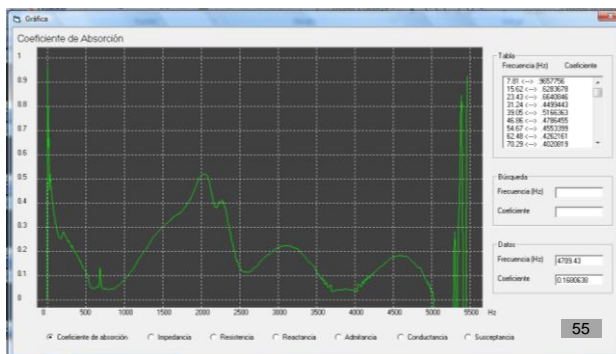


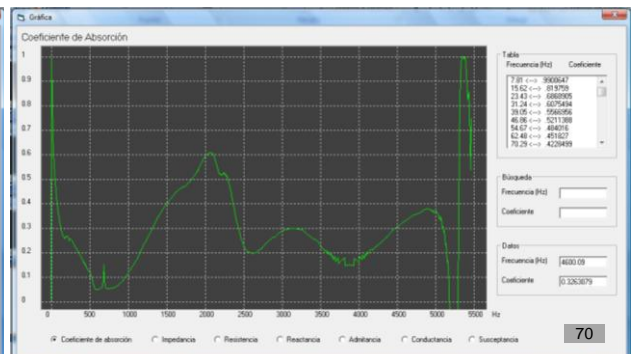
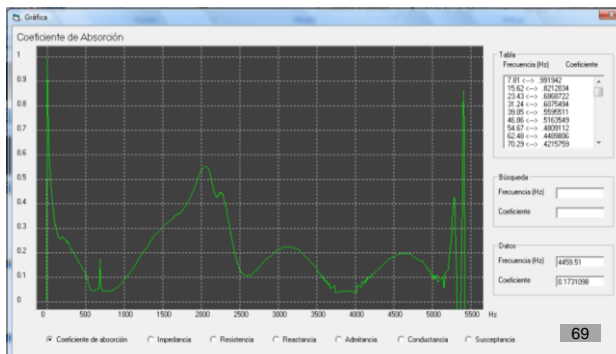
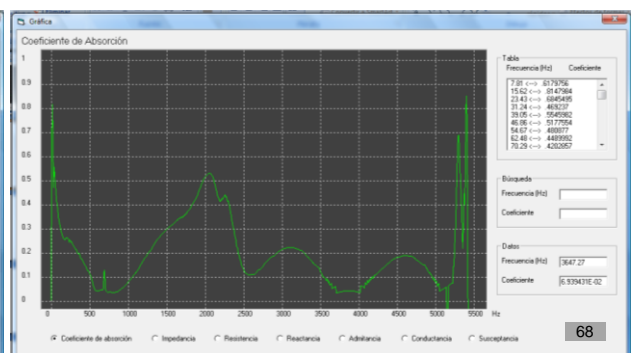
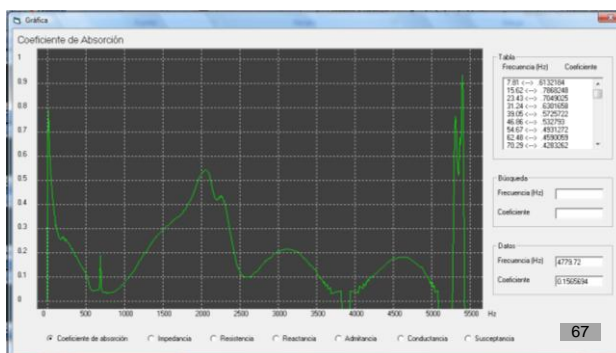
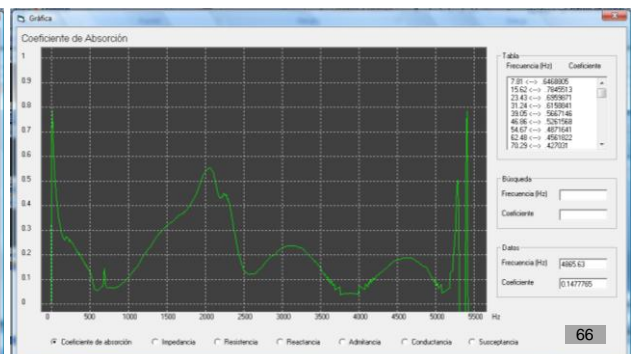
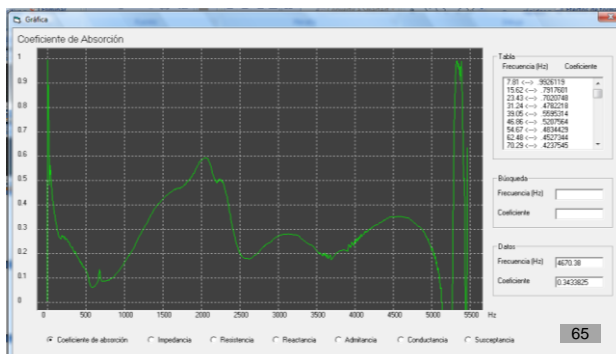
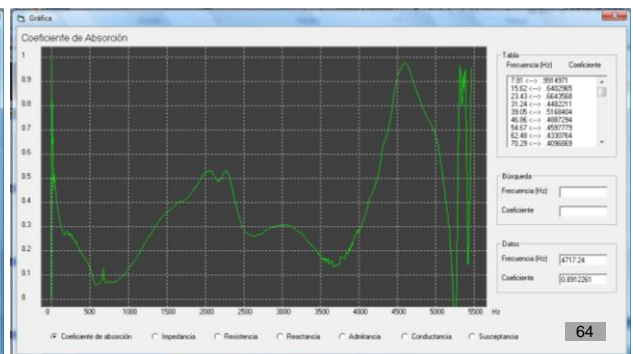
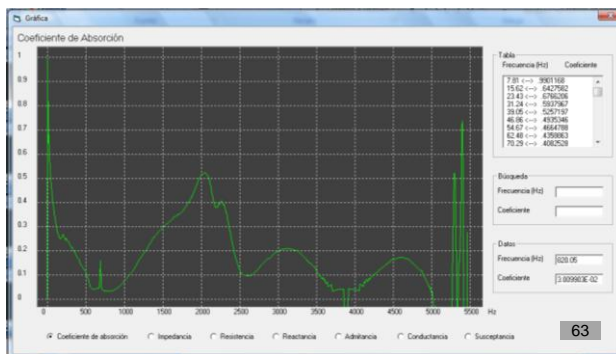


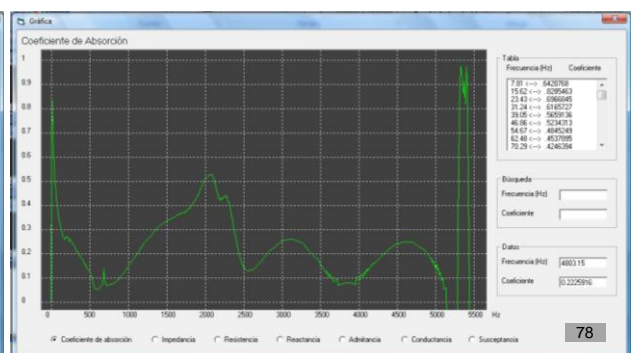
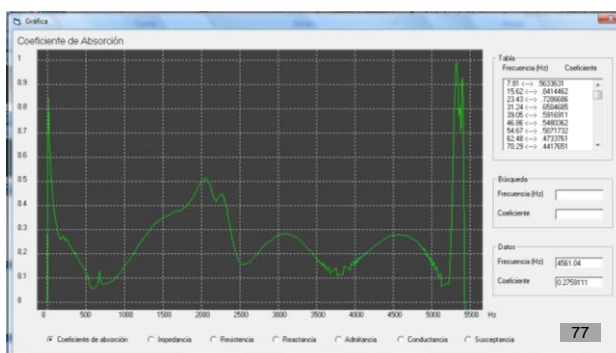
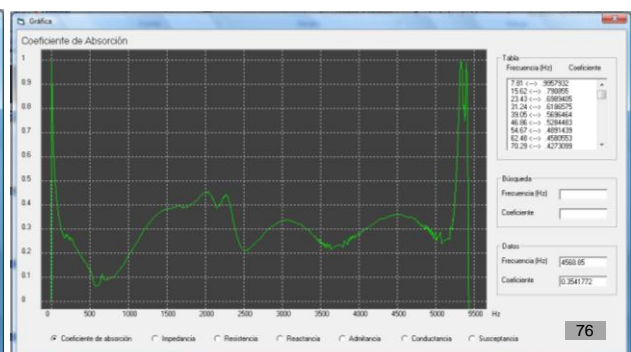
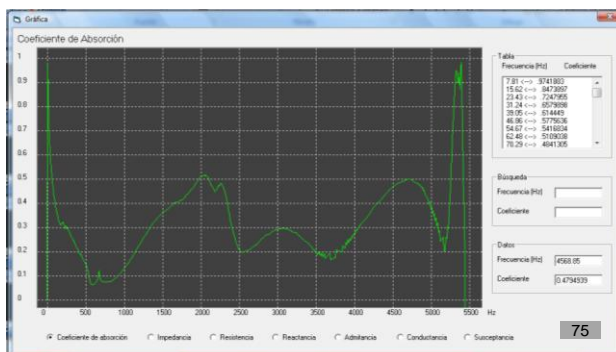
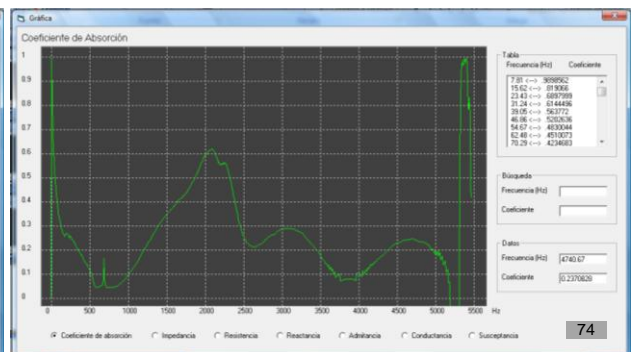
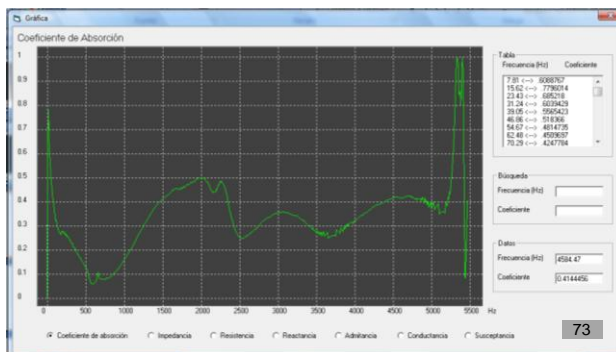
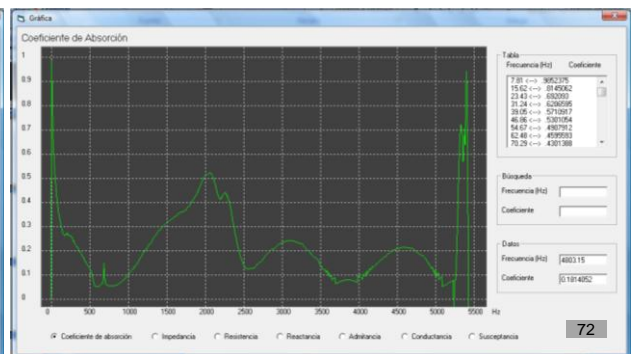
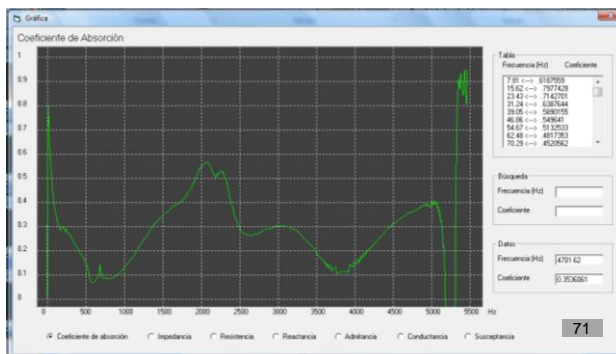


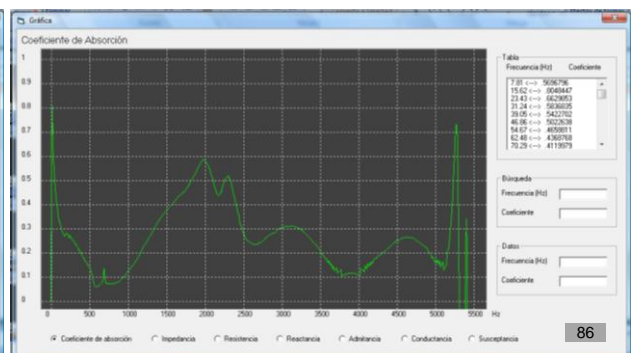
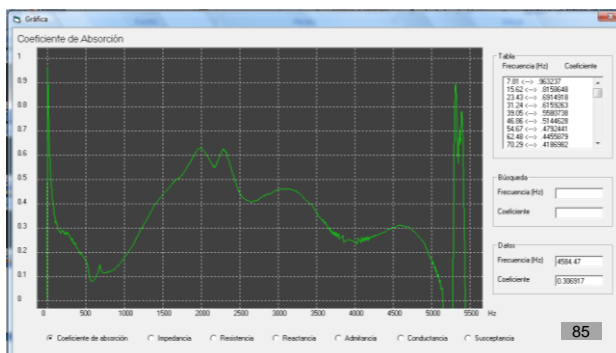
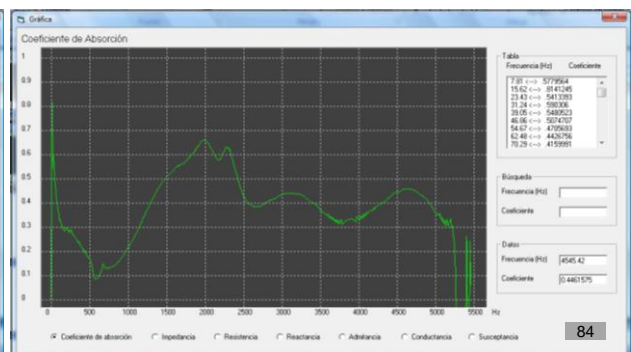
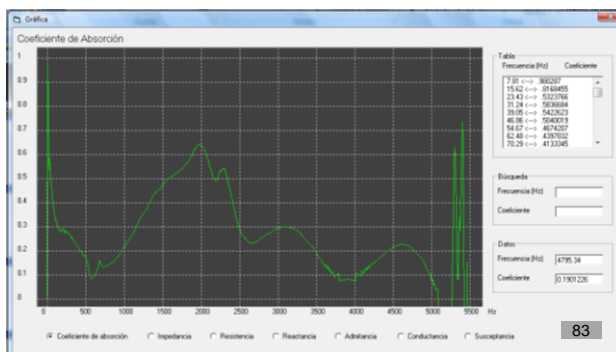
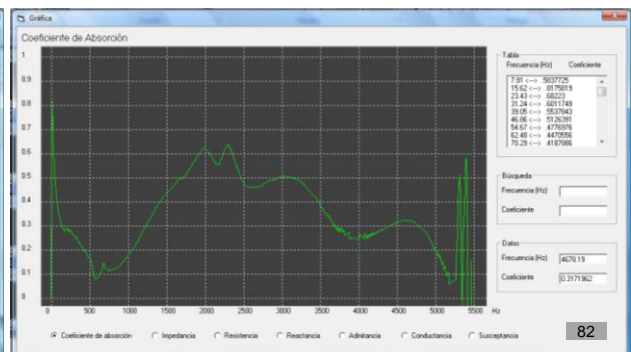
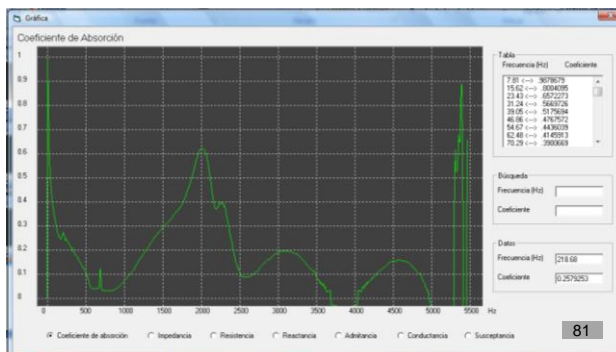
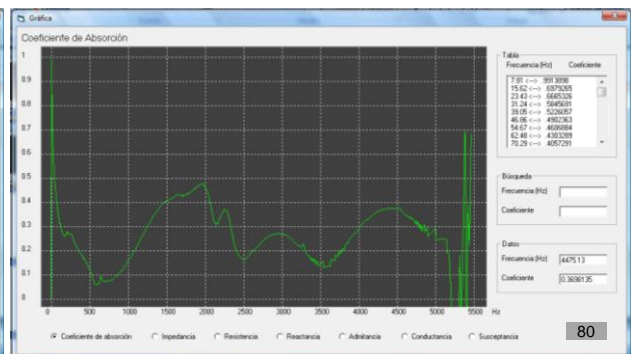
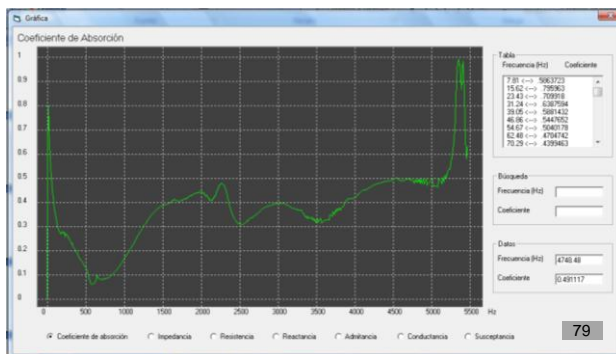


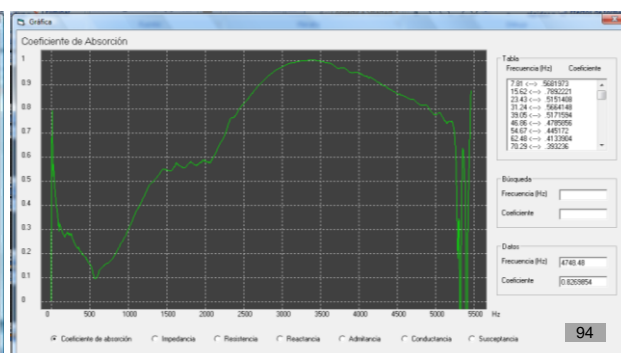
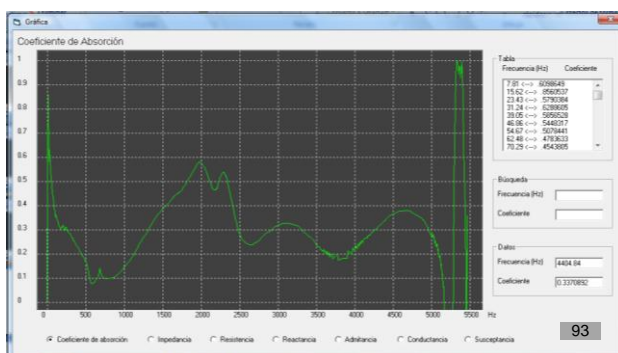
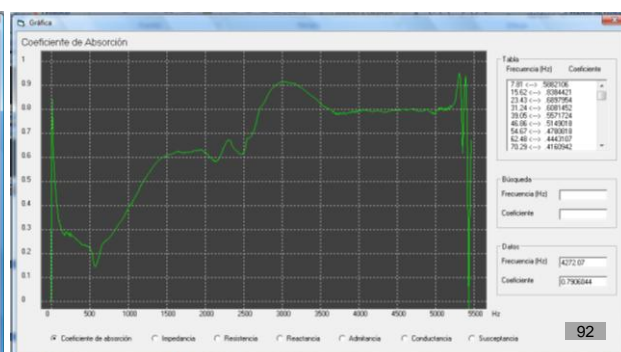
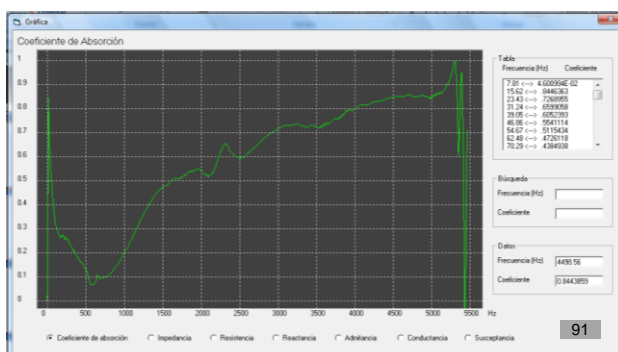
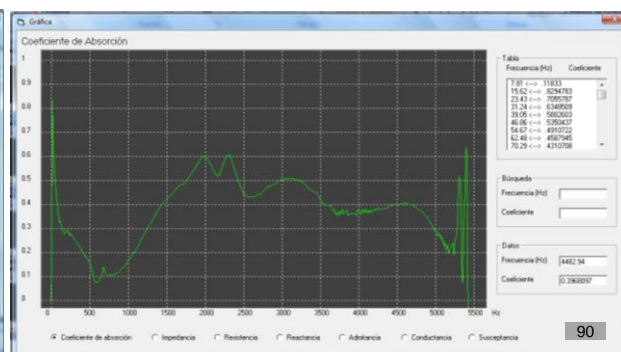
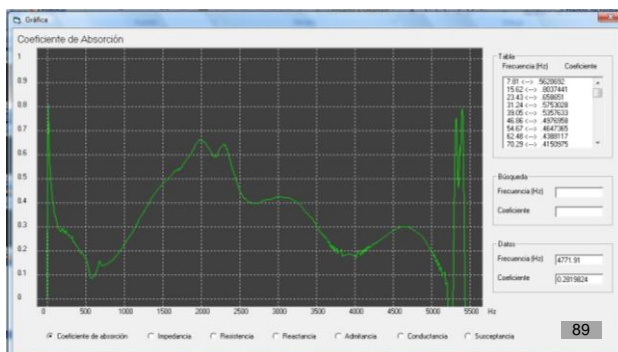
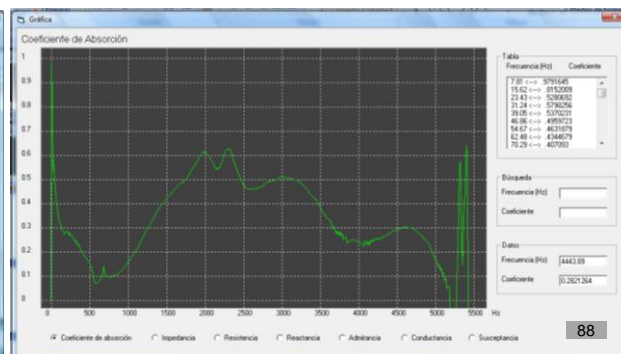
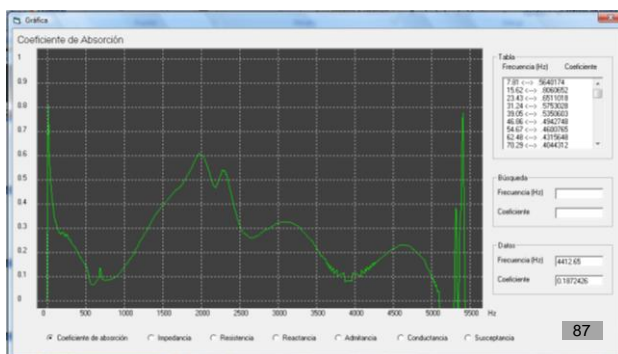


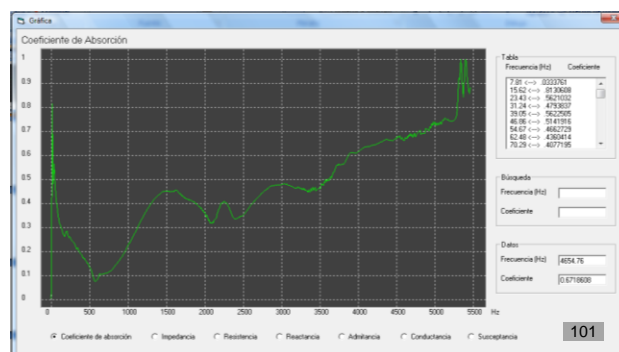
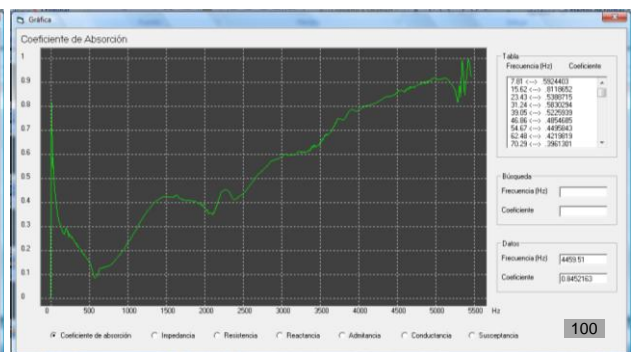
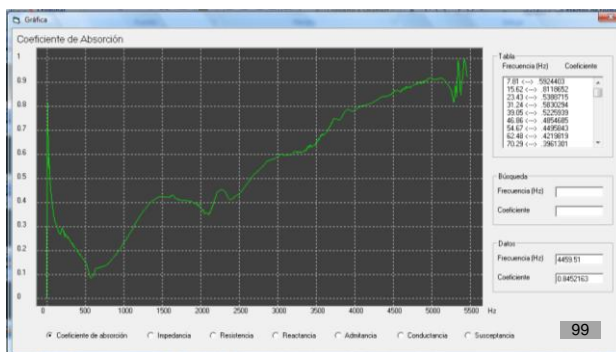
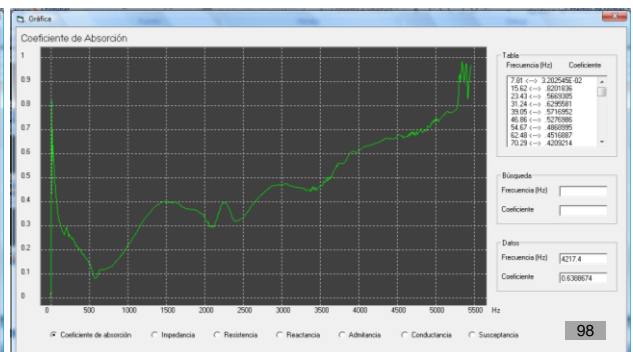
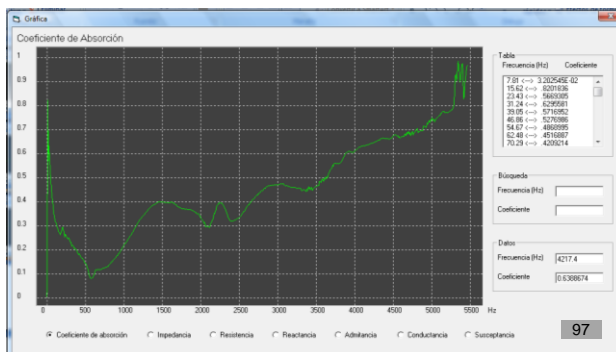
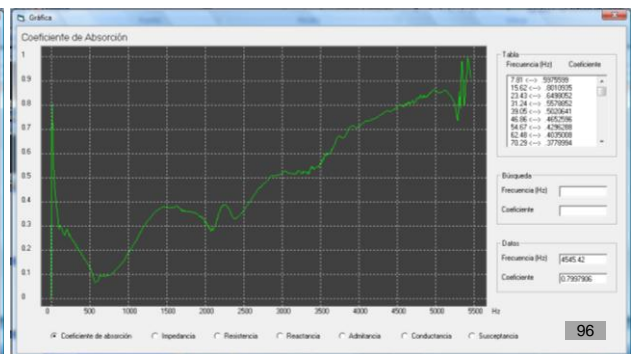
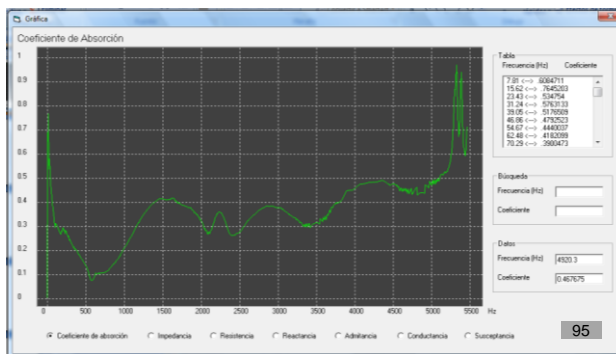












Resumen Curricular

Arquitecta egresada de la Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco en 2008. En ese mismo año, fue aceptada dentro del programa de Especialización, Maestría y Doctorado en la línea de Arquitectura Bioclimática, finalizando sus estudios de Especialización en 2009.

Su experiencia profesional en relación a la acústica arquitectónica y ruido urbano, se ha desarrollado en el Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico (LADAc) de la UAM–A, desde el 2008.

A partir del 2009 se convierte en profesora adscrita al Departamento de Procesos y Técnicas de Realización en la UAM-A, impartiendo UEAS en Tronco General y Arquitectura, tales como: Expresión Formal I y II, Taller de Expresión Arquitectónica II y III, así como UEAS optativas con el tema de Teatros, Auditorios y Salas de Concierto, y Diseño Sustentable y Ecotecnologías.

Ha participado en congresos internacionales desde el 2010, presentando trabajos de investigación realizados en colaboración con los miembros del LADAc.